

питания. Разработано и экспериментально проверено устройство коммутации питающего напряжения и информационного сигнала в рамках разработки комплекса модульных роботов.

Список использованных источников

1. Петин В.А. Arduino и Raspberry pi в проектах Internet of Things. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 320 с.
2. Daniela L. Rus. Electropermanent Magnetic Connectors and Actuators: Devices and Their Application in Programmable Matter. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
3. K. Gilpin, A. Knaian, and D. Rus. Robot pebbles: One centimeter modules for programmable matter through self-disassembly. In Robotics and Automation, 2010. ICRA '10. IEEE International Conference on, Anchorage, AK, 2010.

УДК 543.082/.084:54-14; 541.12.011.3.082/.084

## **ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩЕЙ СМЕСИ В УСТРОЙСТВЕ СЕПАРАЦИИ**

В.А. Зеленский, А.А. Сушин, А.И. Щодро  
Самарский университет, г. Самара

В работе [1] предложен способ управления технологическим процессом сепарации, основанный на косвенном измерении плотности нефтесодержащей смеси. Представляется целесообразным определить источники возникновения погрешностей, получить математическую модель и с её помощью оценить величину погрешности измерений.

На рисунке 1 показано устройство сепарации (первая камера), реализующее предложенный способ управления. Цифрами обозначены: 1 – датчик давления газа, 2 – датчик уровня жидкости, 3 – разделительная перегородка между камерами сепаратора высотой  $h_{пер}$ , 4 – устройство управления, 5 – датчик температуры, 6 – датчик гидростатического давления жидкости, 7 – вентиль сброса воды, 8 – входной вентиль нефтесодержащей смеси.

Измерение плотности происходит косвенным способом с использованием основного уравнения гидростатики:

$$p_d = p_n + \rho g h_{жс},$$

где  $p_d$  – давление на дне,  $p_n$  – давление на поверхности,  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h_{жс}$  – уровень жидкости.

Тогда плотность жидкости в камере устройства сепарации равна:

$$\rho = \frac{p_d - p_n}{g h_{жс}}.$$

Нефти различных месторождений России характеризуются широким диапазоном плотности: от 770 до 970 кг/м<sup>3</sup>. Плотность нефтей изменяется в

пределах каждого нефтегазоносного района. Тем не менее, для одной скважины или куста скважин, плотность нефти – стабильная величина на достаточно протяжённом временном интервале [2].

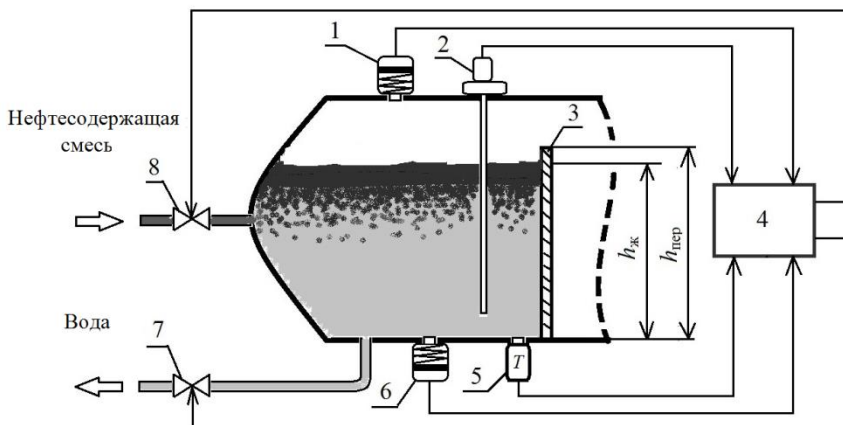


Рисунок 1 - Устройство сепарации с элементами косвенного измерения плотности нефтедержащей смеси

Значение погрешности при косвенных измерениях определяется по формуле:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2},$$

где  $x_i$  – величины, определяемые методом непосредственных измерений;  $\Delta x_i$  – погрешности величин  $x_i$ ,  $f$  – функциональная зависимость, связывающая расчётную и непосредственно измеряемые величины.

Используя полученные формулы, представим основную абсолютную погрешность определения плотности нефтедержащей смеси в виде:

$$\Delta \rho = \sqrt{\frac{\Delta p_d^2}{g^2 h_{ж}^2} + \frac{\Delta p_n^2}{g^2 h_{ж}^2} + \frac{(p_d - p_n)^2 \Delta h_{ж}^2}{g^2 h_{ж}^4}}.$$

Анализ показал, что на практике данное выражение можно упростить путём отбрасывания третьего слагаемого под корнем. Тогда формула для упрощённого расчёта абсолютной погрешности косвенного измерения плотности запишется в виде:

$$\Delta \rho_{упр} = \frac{1}{g h_{ж}} \sqrt{\Delta p_d^2 + \Delta p_n^2}.$$

Величину ошибки такого приближения можно оценить, зная погрешности измерительных приборов, используемых на практике, уровень жидкости в камере устройства сепарации и разность давлений на поверхности жидкости (давление газа) и на дне сепаратора (гидростатическое давление). Для этого необходимо приведённые погрешности средств измерения, которые обычно указываются в документации, перевести в абсолютные значения по формуле:

$$\Delta = \frac{\gamma D}{100},$$

где  $\gamma$  – приведённая погрешность,  $D$  – диапазон измерения.

Характеристики типовых измерительных приборов приводятся ниже.

1. Датчик гидростатического давления Rosemount 3051L. Его основная приведённая погрешность  $\pm 0,075\%$ , диапазон измерения давления 0... 1600 кПа, следовательно, абсолютная погрешность измерения давления равна 1,2 кПа.

2. Датчик давления газа *BD Sensors DMP 331*. Его основная приведённая погрешность  $\pm 0,1\%$ , диапазон измерения давления 0...300 кПа, следовательно, абсолютная погрешность измерения давления равна 0,3 кПа.

3. Датчик уровня ООО НПФ «Сенсорика» DE 10.1. Его основная приведённая погрешность  $\pm 0,075\%$ , диапазон измерения 3,7 м, следовательно, абсолютная погрешность измерения уровня равна 0,0028 м.

При установившемся технологическом режиме происходит постоянный перелив верхнего слоя жидкости из первой камеры НГС во вторую. В этом случае можно принять  $h_{ж} = h_{пер}$ , где  $h_{пер}$  – высота разделительной перегородки. Высота перегородки – постоянная известная величина, следовательно, погрешность её измерения  $\Delta h_{пер} = 0$ . Тогда математическая модель для определения погрешности измерения плотности нефтесодержащей смеси в установившемся технологическом режиме принимает вид:

$$\Delta \rho_{уст} = \frac{1}{gh_{пер}} \sqrt{\Delta p_d^2 + \Delta p_n^2}.$$

При этом метрологические характеристики датчика уровня жидкости не влияют на результирующую погрешность. Поскольку  $h_{ж} \leq h_{пер}$ , с учётом приведённых характеристик измерительных преобразователей, основная абсолютная погрешность определения плотности смеси составит не более  $0,042 \text{ кг/м}^3$ .

Список использованных источников

1. Зеленский, В.А. Повышение эффективности сепарации с помощью контроля дифференциальной плотности нефтегазовой смеси / В.А.Зеленский, А.И.Щодро // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2015. – Серия «Технические науки», № 1(45), – С. 178 - 183.

2. Зеленский, В.А. Способ, математическая модель и алгоритм управления технологическим процессом сепарации нефти /В.А.Зеленский, А.И.Щодро //Вестник Самарского государственного технического университета. – 2016. – Серия «Технические науки», № 3(51). – С. 21–28.

УДК 621.793.14

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРИТЕЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

И.В. Стариков, В.А. Колпаков, С. В. Кричевский, В. В. Подлипов  
Самарский университет, г. Самара

Испарители резистивного типа широко применяются в технологических процессах микро- и нанoeлектроники, нанofотоники для формирования тонкопленочных элементов из многокомпонентных материалов [1,2].

Качество данных пленочных элементов, получаемых резистивным испарением, в значительной мере зависит от конструкции испарителей и свойств испаряемого вещества (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения и рядом других факторов [3, 4]. Анализ конструкций испарителей применяемых в производстве позволяет их разделить на четыре основные группы: поверхностные, тигельные открытого типа, тигельные квазизамкнутого типа и тигельные замкнутого типа дискретного действия [5]. Данное деление обусловлено влиянием их конструктивных элементов на параметры потока испаряемых атомов, а именно, диаграмма направленности и интенсивность потока молекул в ее максимуме. Однако указанные испарители имеют следующие недостатки: непроизводительные потери испаряемого вещества и загрязнение ими вакуумной камеры (пар из испарителя выходит и в то время, когда осаждение пленки не производится) [6]; низкая производительность пленочных элементов, получаемых при одной загрузке испаряемого вещества в испаритель [7]; небольшие скорости осаждения [7]; необходимость автономного использования нескольких испарителей одновременно, так как происходит изменение исходного соотношения компонентов при испарении веществ с разной температурой испарения [8].

Данные недостатки отсутствуют в замкнутых испарителях дискретного действия [9], имеющих затвор. В них молекулы испаряемого вещества выходят только при открытом затворе, т.е. испаряемый материал расходуется только в процессе непосредственного осаждения пленки на подложку. Конструктивный элемент в виде затвора осуществляет точную дозировку количества пара, исходящего из камеры испарителя и с помощью серии импульсов с заданной длительностью и скважностью и позволяет получать пленку необходимой толщины [10].