

ИМИТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

ПОГРУЖНЫХ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ на БОЛЬШИЕ ДИАМЕТРЫ ТРУБОПРОВОДА

Проанализированы способы испытаний погружных вихревых расходомеров больших диаметров. Представлено оборудование, позволяющее имитировать гидравлические процессы в технологическом трубопроводе при работе расходомера. Исследован характер движения жидкости в измерительном канале расходомера методом численного моделирования. Разработана имитационная модель оборудования в приложении Simulink пакета Matlab. Приведены результаты исследования оборудования на модели.

Введение

Внастоящее время решение проблем ресурсосбережения невозможно без коммерческого учета расхода воды. Поэтому возрастает роль измерителей расхода и количества жидкости в связи с необходимостью экономии водных ресурсов, а также для решения экологических проблем в различных отраслях промышленности. Без определения расхода и количества жидкости невозможно обеспечить технологические режимы, их оптимизацию и интенсификацию.

Погружные вихревые кондуктометрические расходомеры являются новым перспективным средством для измерения расхода различных жидкостей. Данные расходомеры могут применяться на трубопроводах больших диаметров.

Для приборов больших диаметров актуальным является снижение их массы и стоимости. Большого эффекта на данном пути можно достичь, отказавшись от корпуса, в котором крепится преобразователь расхода. Если такой путь для других приборов проблематичен, то для вихревых он вполне достижим. В этом случае роль корпуса играет

М.С. Лурье*,
доктор технических наук, профессор кафедры электротехники, ФГБОУ ВПО Сибирский государственный технологический университет

О.М. Лурье,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, ФГБОУ ВПО Сибирский государственный технологический университет

А.С. Фролов,
кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники, ФГБОУ ВПО Сибирский государственный технологический университет

сам рабочий трубопровод или канал, в котором течет жидкость (рис. 1) [1].

Особое место среди вихревых расходомеров занимает вариант погружного типа, представляющий собой генератор вихрей (тело обтекания с приемником вихревых колебаний), который монтируется непосредственно в рабочий трубопровод.

Как известно, за телом обтекания частота вихреобразования в широком диапазоне чисел Рейнольдса (от $3 \cdot 10^3$ до $250 \cdot 10^3$) с высокой степенью точности пропорциональна скорости потока в трубопроводе. Поэтому, зная сечение трубопровода, можно измерять расход. Для более стабильного вихреобразования в теле обтекания делают поперечное отверстие, которое называется каналом обратной связи (КОС). В нем обычно монтируется приемник — преобразователь вихревых колебаний (ППВК). В процессе работы в КОС устанавливается знакопеременный переток жидкости с частотой вихреобразования, которая регистрируется ППВК.

Испытания данных расходомеров можно осуществлять двумя методами — проливным и имитационным.

Проливной метод реализуется на специальных проливных установках на диаметр трубопроводов 250–300 мм, которых в России очень мало. Установки на диаметры условных проходов 300–800 мм существуют лишь в единичных экземплярах, а на диаметры свыше 800 мм вообще отсутствуют. Также можно отметить редкость горячеводных проливных установок на малые и средние диаметры трубопровода из-за больших финансовых вложений по сравнению с холодноводными установками того же диаметра. Это обстоятельство делает невозможным выпуск и испытания расходомеров и счетчиков жидкости на большие диаметры трубопроводов.

Имитационный метод испытаний обычно заключается в задании поверочного на-

*Адрес для корреспонденции: m_o_l@rambler.ru

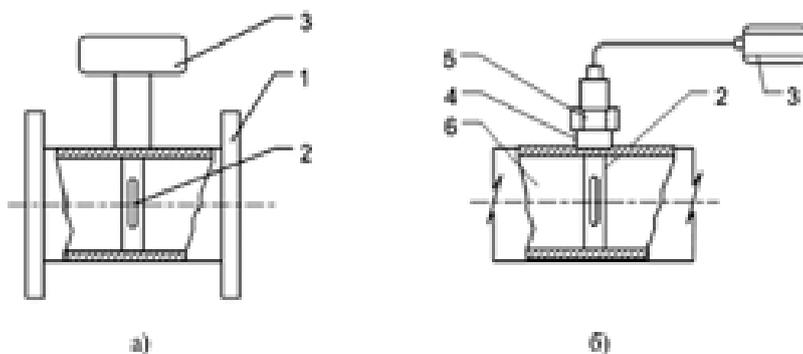


Рис. 1. Обычный (а) и погружной (б) варианты вихревого расходомера. 1 – корпус прибора; 2 – тело обтекания; 3 – электронный блок; 4 – стакан для крепления тела обтекания; 5 – герметизирующая гайка; 6 – рабочий трубопровод.

пряжения на электродах первичного преобразователя, что позволяет поверить только электрический тракт приборов при сигналах, параметры которых могут отличаться от реальных. Такая поверка в некоторых случаях допускается метрологическими органами, но она не гарантирует точности измерений. Здесь, в сущности, происходит распространение метрологических характеристик расходоизмерительного оборудо-

вания малых условных проходов, которые подтверждаются поверкой его на проливных установках, на расходомеры больших диаметров. Если при работе оборудования на чистой воде такой подход может быть допустим, то для другой измеряемой среды, например, волокнистой суспензии, он совершенно не правомерен. Это обстоятельство требует отыскания других методов имитационных испытаний.

Для дальнейшего анализа вихревого расходомера с телом обтекания и его имитационных испытаний представим его в виде структурной схемы, изображенной на рис. 2.

В настоящее время методы поверки имитационным способом разработаны для многочисленных расходомеров, что является их большим достоинством.

Но некоторые условия таких испытаний далеки от рабочих. Например, электрический метод ограничивается подачей на вход прибора заранее заданных электрических сигналов и наблюдением за реакцией на выходе; гидравлический тракт прибора и его взаимодействие с приемником-преобразователем вихревых колебаний не проверяется [2]. Испытанию подвергается лишь

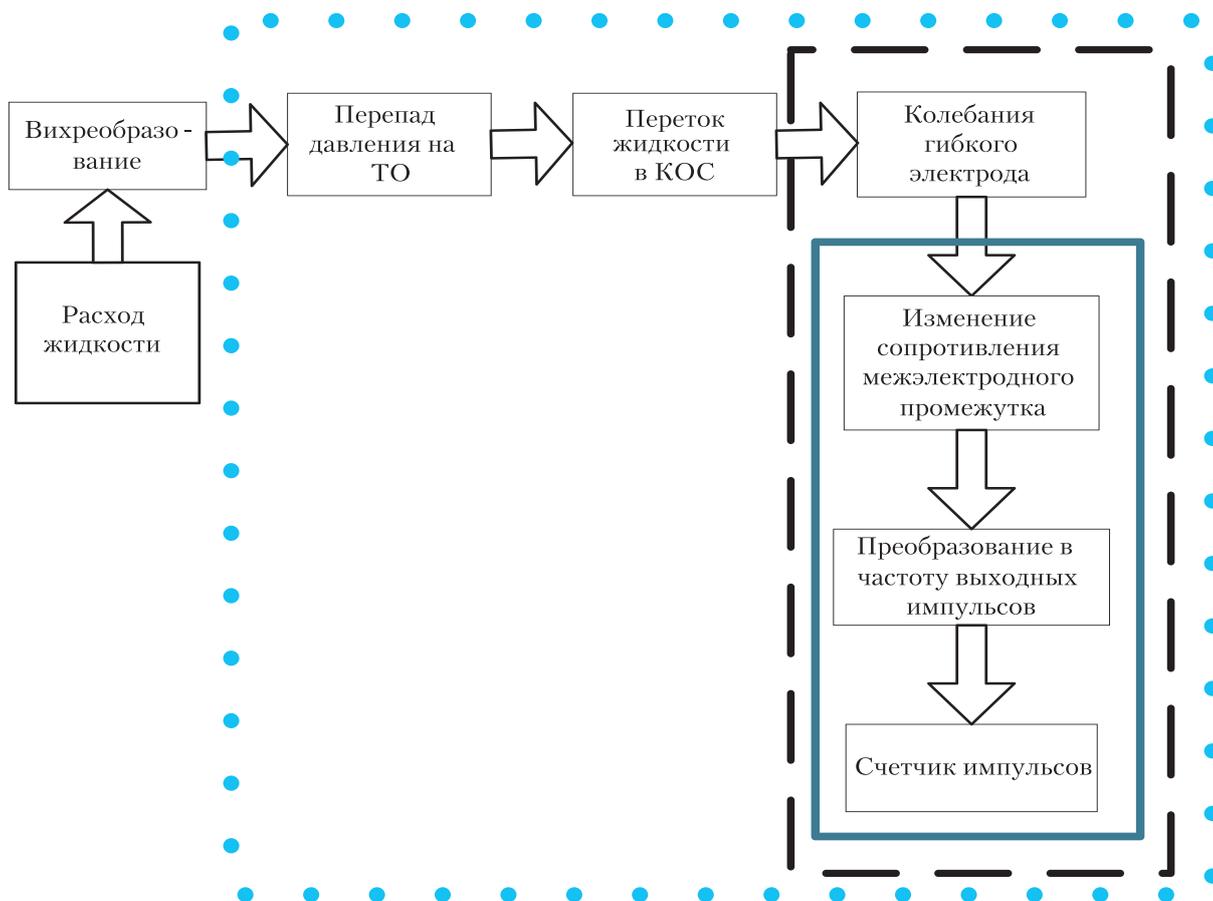


Рис. 2. Структурная схема процессов, протекающих в вихревом расходомере с телом обтекания.

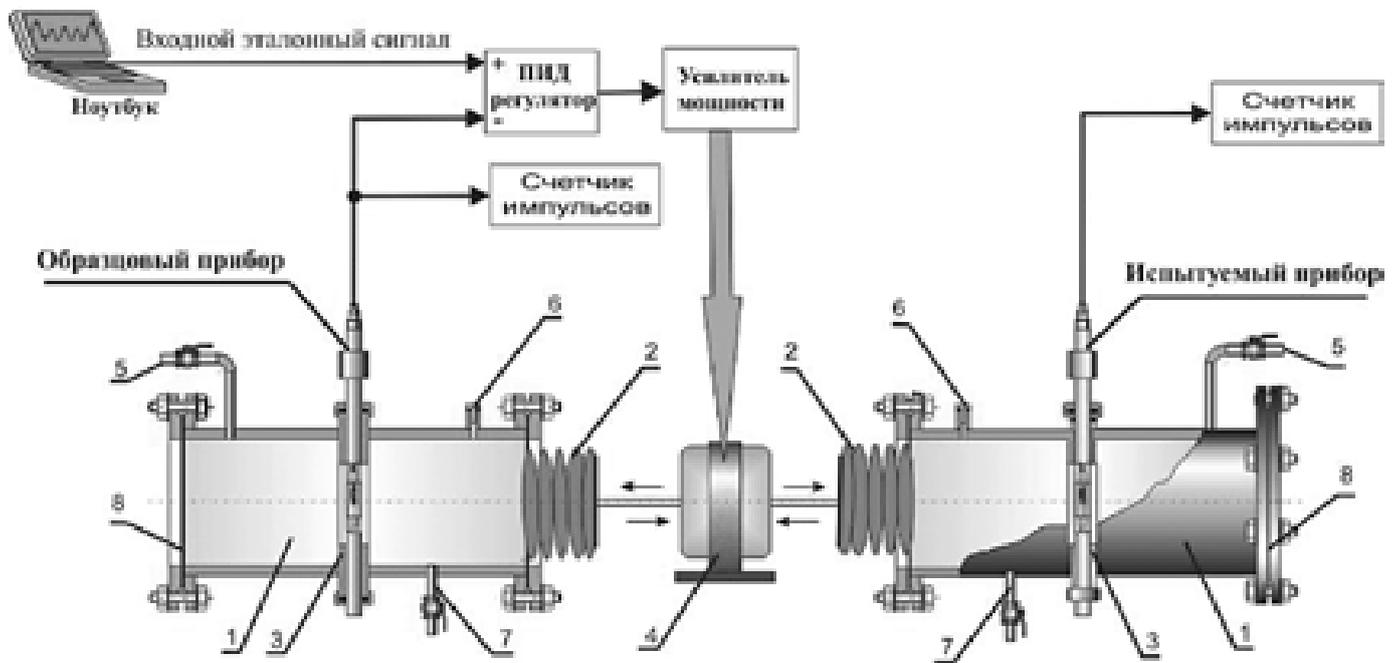


Рис. 3. Оборудование для испытаний погружных вихревых расходомеров.

часть рабочих процессов расходомера, изображенная на рис. 2 сплошной линией.

Другой метод был использован для испытаний расходомера «Фотон». Там за счет механических колебаний расходомера в неподвижной жидкости имитировалось вихреобразование и воздействие его на ППВК [3]. Область данного испытания изображена на рис. 2 пунктирной линией. Такой метод хотя и захватывает гораздо больший круг процессов, подвергающихся испытаниям, но всё же не лишен недостатков. Главные из них: невозможность проверки работы прибора во всем диапазоне измерения расходов — для этого необходимо, чтобы весь прибор колебался в воде с частотой до 40–50 Гц; невозможность точного подбора режимов движения тела обтекания относительно жидкости, т.к. для этого необходимо перемещать прибор по относительно сложному закону, амплитуда которого точно неизвестна.

Разработанное оборудование позволит при испытаниях охватить значительно больший круг процессов, протекающих в вихревом расходомере. На рис. 2 данная область показана точками. Это повысит достоверность испытаний, позволит учесть особенности реальной рабочей среды, а также создаст метрологическое обеспечение выпуска погружных вихревых расходомеров.

В основе работы оборудования (рис. 3) лежит допущение о том, что для получения электрического сигнала определенной фор-

Ключевые слова: имитационные испытания, расходомер, вихревой, модель.

мы и величины с ППВК необходимо воздействовать на него перепадом давления также строго определенной формы. Если на выходе ППВК будет формироваться сигнал, близкий к реально действующему сигналу в приборе на заданном расходе, то и гидродинамический режим работы КОС и ППВК будет близок к реально существующему во всем диапазоне расходов и рабочих температур.

Данное оборудование представляет собой две одинаковые цилиндрические камеры 1, торцевые стенки которых состоят из сильфонов 2 с жестким центром и мембраны 8 без жесткого центра. Камеры заполняются жидкостью через патрубки 5. Через пробки 6 из них выпускается остаточный воздух. Поперек камер устанавливаются перегородки 3, в которые через уплотнения вставляются тела обтекания образцового и испытуемого расходомера. Боковые стенки тел обтекания с отверстиями КОС должны быть направлены параллельно перегородке. С жесткими центрами сильфонов 2 соединен электродинамический привод 4, приводящий их в колебательное движение. Привод оборудования охвачен обратной связью по выходному сигналу расходомера через пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор и усилитель мощности привода [4].

Входным эталонным сигналом для оборудования является электрический сиг-

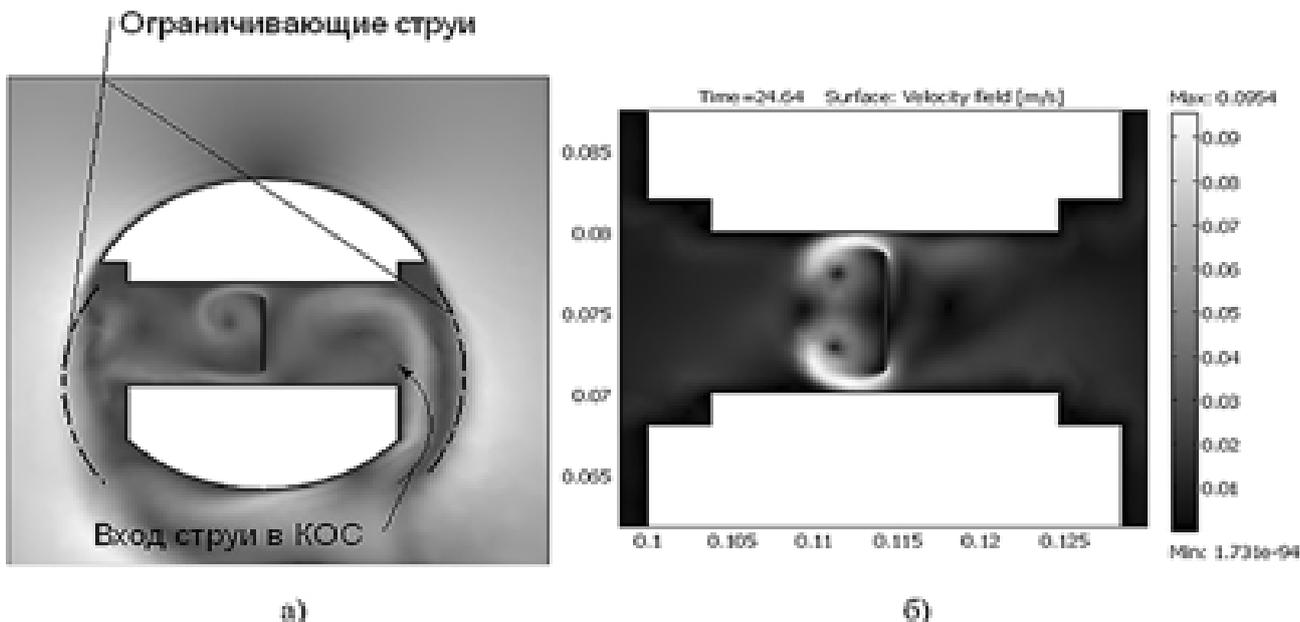


Рис. 4. Результаты расчета поля скоростей в КОС при минимальном расходе ($U_{cp} = 0,1$ м/с): на трубопроводе (а); на оборудовании (б).

нал с выхода образцового расходомера на заданном расходе, предварительно записанный на проливной установке. В силу действия цепи обратной связи при работе оборудования на мембранах обеих камер создаются одинаковые механические колебания, параметры которых определяются эталонным сигналом. В обеих камерах на срезах КОС создаются знакопеременные перепады давления, возникают знакопеременные перетоки жидкости через чувствительные элементы образцового и испытуемого расходомеров. Таким образом, при одинаковой геометрии камер оборудования в них протекают одинаковые гидродинамические явления. Это позволяет считать, что подавая сигналы, предварительно записанные на реальной проливной установке для различных поверяемых расходов, мы будем имитировать на оборудовании работу расходомера в условиях различных расходов измеряемой среды.

В процессе испытаний электронные блоки расходомеров формируют определенное количество импульсов, пропорциональное некоторому имитационному объему жидкости, прошедшему через приборы. Их количество фиксируется соответствующими счетчиками. Сравнивая показания счетчиков импульсов образцового и испытуемого расходомеров, можно судить о погрешности измерения на данном испытательном расходе [5].

При установке расходомера в трубопровод жидкость в КОС движется под действием перепада давлений, образованного вихревой формацией. На имитационном оборудовании она движется под действием перепада давлений, искусственно созданных перемещением мембранных стенок камеры. Характер движения жидкости в КОС в этих двух случаях может несколько отличаться. Исследования этих случаев проводились с использованием численного моделирования с помощью программы Comsol Multiphysics 3.5. На рис. 4 изображены результаты расчета поля скоростей в КОС вихревого расходомера, установленного в реальном трубопроводе и на оборудовании.

Поскольку сечение камеры больше сечения КОС, то скорости потока в камере будут значительно меньше скоростей потока в КОС. Поэтому на рис. 4 б показана область в окрестности КОС с гибким электродом (чувствительным элементом).

Сравнение результатов моделирования показывает, что симметричность силы, действующей на гибкий электрод (рис. 4 б), устраняет паразитные колебания последнего вокруг продольной оси и улучшает условия работы прибора при испытаниях его на оборудовании по сравнению с реальными условиям на трубопроводе (рис. 4 а). Таким образом, условия работы прибора на испытательном оборудовании оказываются лучше, чем в реальном трубопроводе.

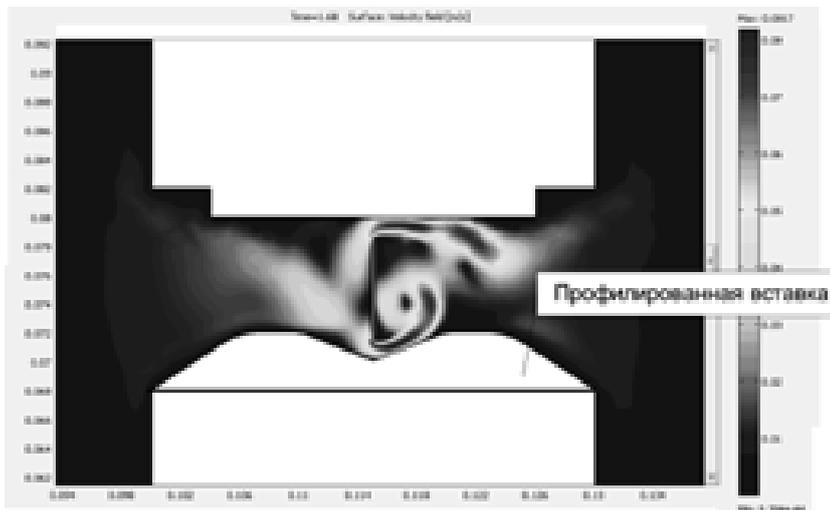


Рис. 5. Гидродинамика в камере оборудования с профилированной вставкой.

Возникает проблема несоответствия поля скоростей жидкости в камере и реальном трубопроводе.

Путь решения данной проблемы найден в использовании специальной профилированной вставки, которая устанавливается в КОС на время испытания. На рис. 5 изображено поле скоростей жидкости в камере оборудования с профилированной вставкой.

Данная вставка обеспечивает несимметрию обтекания гибкого электрода ППВК. Ее геометрия подобрана так, что условия работы прибора на оборудовании и в реальном трубопроводе становятся одинаковыми.

Для описания движения жидкости в камерах имитационного оборудования был использован «метод контрольного объема», который позволил получить уравнение для средней скорости движения жидкости в КОС - $V_{КОС}$ [4].

Для выбора наиболее оптимальных конструктивных параметров установки, выяснения особенностей ее работы в различных режимах и отработки методики испытаний была создана ее имитационная модель. В ней учтены уравнения, полученные для математической модели.

Согласно структурной схеме процессов в оборудовании (рис. 2, 3), модель одной камеры оборудования для имитационных ис-

пытаний без регулятора, с установленным в ней расходомером, должна состоять из следующих блоков (рис. 6):

- - блок электродинамического привода (ЭДП);
- - блок камеры испытательного оборудования;
- - блок кондуктометрического ППВК;
- - электронный блок.

Входной величиной модели является напряжение, которое подается на ЭДП, $U_{вх}(t)$. На выходе модели формируется переменное напряжение $U_{вых}(t)$, снимаемое с расходомера.

Выходной величиной блока ЭДП должна быть сила $F(t)$, действующая на мембраны соответствующего блока камеры испытательного оборудования.

В блоке камеры испытательного оборудования будет происходить преобразования силы $F(t)$ в давление на срезе КОС испытываемого расходомера. Выходным параметром данного блока будет скорость знакопеременного перетока жидкости в КОС - $V_{КОС} = f(t)$.

Скорость $V_{КОС}$ является входным параметром блока ППВК. Под действием потока, движущегося с этой данной скоростью, будет производиться отклонение гибкого электрода ППВК $Y(t)$, которое является выходной величиной блока ППВК.

В свою очередь величина отклонения гибкого электрода $Y(t)$ является входной величиной для электронного блока. Выходной величиной электронного блока будет напряжение, снимаемое с датчика.

Для сокращения времени и средств на разработку оборудования, а также для оптимизации его параметров разработана имитационная модель в среде Simulink программы Matlab.

Модели камер и расходомеров, полученные в работе, представляют собой полные имитационные модели, которые учитывают все физические особенности и конструкцию данных устройств. Для снижения вычислительной нагрузки моделирования они были подвергнуты линеаризации. Это дало возможность показать эти модели в виде передаточных функций (рис. 7).

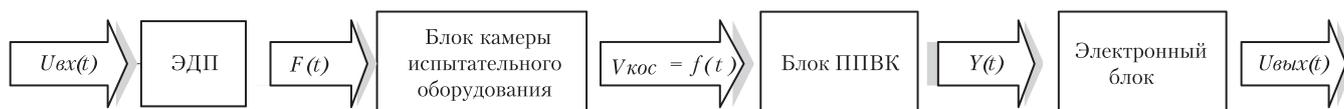


Рис. 6. Общая блок-схема модели имитационного оборудования.

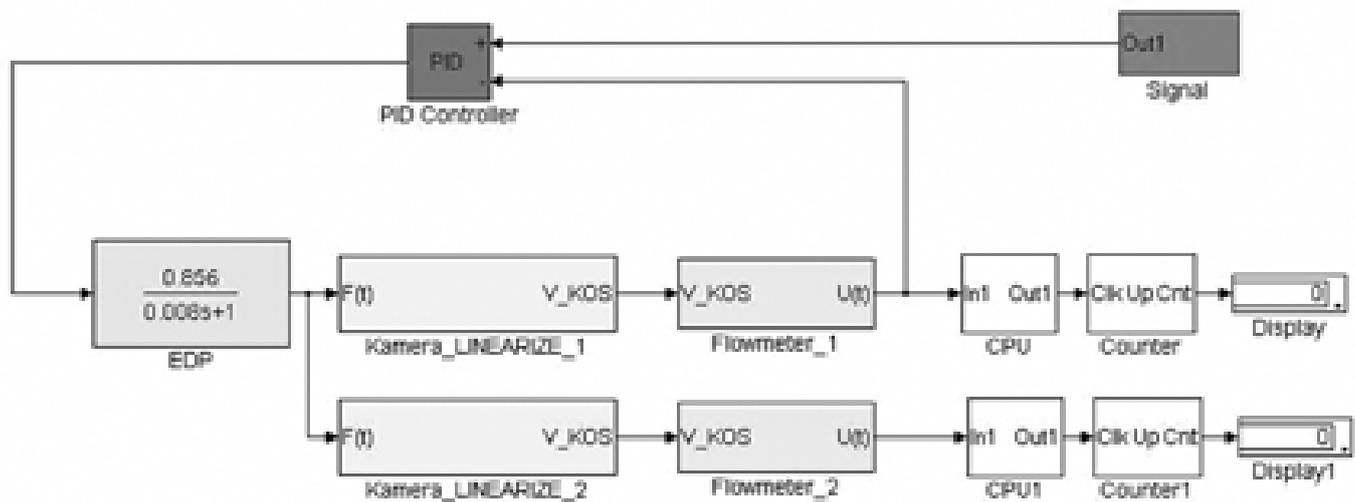


Рис. 7. Полная имитационная модель испытательного оборудования.

Модель имеет входные и выходные величины и параметры, соответствующие реально существующим величинам, для сопоставления между собой результатов моделирования и испытаний разработанного на их основе оборудования.

Модель состоит из следующих блоков:

- блоков камер оборудования, моделирующих процессы протекания жидкости (волоконистой суспензии) через КОС расходомеров под действием знакопеременного перепада давлений. Их два — Kamera_LINEARIZE_1 и Kamera_LINEARIZE_2;
- блока электропривода EDP, моделирующего электродинамический привод, создающий знакопеременную силу на мембранах камеры;
- блоков испытуемых расходомеров, моделирующих работу погружных вихревых кондуктометрических расходомеров Flowmeter_1 и Flowmeter_2;

- блока ПИД-регулятора, моделирующего пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор в цепи обратной связи оборудования PID Controller;
- блока входного тестового сигнала, моделирующего аналого-цифровой преобразователь, задающий управляющий сигнал оборудования, Signal;
- блоков CPU, CPU1, Counter, Counter1, Display и Display1, предназначенных для съема, обработки и анализа моделируемых параметров.

Входной величиной модели является расход жидкости Q , который задается соответствующим тестовым сигналом. На его выходе импульсы с некоторым удельным весом. Произведение количества импульсов за время испытания на их удельный вес равно объему жидкости, измеренному прибором.

Исследования модели оборудования проводились с эталонными сигналами, соответствующими диапазону реальных скоростей технологической жидкости в трубопроводе от 0,1 до 4 м/с, что соответствует диапазону реальных расходов — от минимального до номинального.

При этом выяснилось, что оборудование воспроизводит эталонный сигнал со всеми его особенностями с высокой точностью. Пример осциллограммы входного и выходного сигналов приведен рис. 8.

В результате на созданной имитационной модели оборудования можно было проводить различные исследования, например:

- 1) исследовать работу оборудования в различных его режимах;

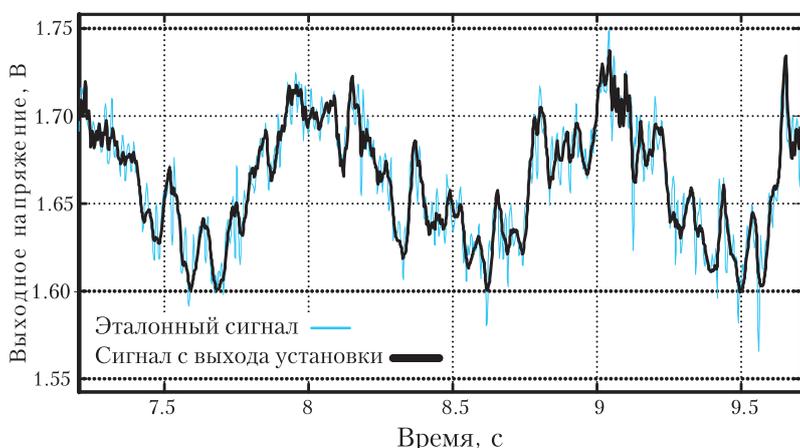


Рис. 8. Осциллограмма сравнения эталонного сигнала с выходным сигналом оборудования.

2) оптимизировать настройки регулятора электропривода оборудования;

3) исследовать влияние на работу оборудования его конструктивных характеристик и выбрать наиболее оптимальные;

4) отработать методику испытаний на имитационном оборудовании.

Данные моделирования разработанной установки показали, что динамическая погрешность не превышает 0,5 % во всех режимах работы оборудования, что позволяет использовать рассмотренное оборудование для испытаний погружных вихревых расходомеров.

Для формирования испытательных (эталонных) сигналов предложены два пути. Первый путь — это запись сигнала с аналогового выхода расходомера на различных расходах установленного на проливной установке. Достоинством данного метода является абсолютное соответствие испытательного сигнала реальным условиям эксплуатации расходомера и получение сигнала, несущего индивидуальные особенности работы конкретной проливной установки. К недостаткам можно отнести наличие электрических наводок и помех в записанном сигнале (наводки 50 Гц осветительного оборудования, приводов проливных установок). Поэтому такие записи необходимо предварительно фильтровать.

Второй путь заключается в анализе спектра реальных сигналов, записанных на работающих установках, и синтезе на данной основе искусственных испытательных сигналов. Данный путь является более перспективным потому, что при анализе сигнала можно сразу устранить различные наводки, выбросы, импульсные помехи. Кроме того, можно синтезировать такие сигналы, которые в принципе не могут быть получены на проливной установке. Это соответствует работе расходомеров в составе дозаторов,

системах автоматического регулирования, в условиях переменных расходов, в трубопроводах, снабженных клапанной запорной арматурой и т.п.

Заключение

Таким образом, предлагаемый подход к имитационным испытаниям погружных расходомеров, совместно с моделированием работы отдельных узлов и испытательного оборудования в целом, позволяет выйти на новое качество проектирования приборов рассчитанных на большие диаметры трубопровода для измерения различных жидкостей.

Литература

1. Лурье М. С. Кондуктометрические погружные расходомеры для трубопроводов больших диаметров / М. С. Лурье, М. Ю. Елизарьева // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. № 4. С. 33–35.
2. Инструкция ГСИ. Вихревые кондуктометрические погружные расходомеры ВКПР. Методика поверки АВК.297439.100 ДЗ. Красноярск: ООО Интра-с, 2005. 25 с.
3. Инструкция. Погружные вихревые счетчики холодной и горячей воды «Фотон». Методика поверки АВК.297.439.080.Д2. Красноярск: ООО Интра-с, 1999. 22 с.
4. Пат. 2379636 РФ / Лурье М. С., Плотников С. М., Ланкин Д. А., Фролов А. С. Имитационный стенд для поверки вихревых водосчетчиков. Заявлено 18.09.2008. Опубликовано 20.01.2010. Бюл. № 2. Приоритет 20.01.2010.
5. Лурье М. С. Оборудование для технологических испытаний погружных вихревых расходомеров и счетчиков волокнистых суспензий / М. С. Лурье, А. С. Фролов // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 7. С. 62–65.

M.S. Lurye, O.M. Lurye, A.S. Frolov

SIMULATION TEST OF BURIED VORTEX FLOWMETERS FOR CONDUITS OF HIGH DIAMETER

Test methods of buried vortex flowmeters of high diameter are analyzed. This article discusses facilities allowing for simulation of hydraulic processes in a technologic conduit when a flowmeter operates. Mode of a fluid flow in a measuring canal of the flowmeter was studied using a method of numerical modeling. Simulation model of facilities was developed in the Simulink application of the Matlab package. Results on model research of facilities were shown.

Key words: simulation testing, vortex flowmeters, model