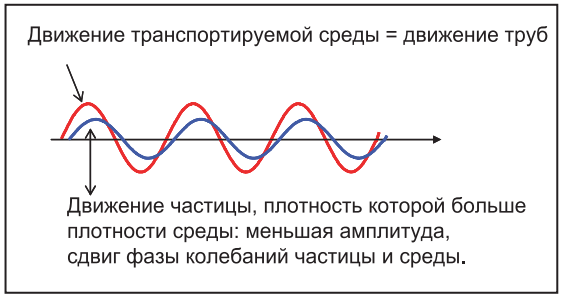
Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двухфазного потока

Приведены общие соображения и выводы по поводу использования классического расходомера с двумя U-образными трубами.

Наибольшие сложности, с которыми сталкиваются заказчики кориолисовых расходомеров, обусловлены недостаточной чувствительностью при измерениях с двухфазными текучими средами. Последнее означает, что показания массового расхода и/или плотности становятся неверными, либо, в наихудшем случае, приборы вообще перестают работать. В настоящей статье дано объяснение этому явлению с акцентом на случай газа в жидкостях (для краткости именуемый «аэрацией»), приведен анализ работы классического измерителя с двумя U-образными трубками и рекомендации по его использованию в таких приложениях.

1. Описание основных аспектов на примере твердых частиц в жидкостях

Кориолисовы измерители состоят из одной или двух труб, колеблющихся по вертикали относительно направления потока. Сила Кориолиса определяется из условия, что все частицы в трубе сдвигаются в сторону с амплитудой колебания трубы. Это относится к однофазным средам. В случае же двухфазных сред картина может быть иной. Рассмотрим, например, твердую частицу большей плотности, чем плотность среды, в которой она транспортируется по кориолисовой трубе. Поперечное ускорение частицы обусловлено действием сил со стороны среды, и так как плотность частицы в данном случае больше плотности этой среды, движение частицы будет менее активным, чем движение среды.



При перемещении частицы относительно ее «родительской» фазы возникают следующие эффекты:

A. Из-за трения между частицей и средой происходит поглощение энергии, поэтому:
   A1: Расход энергии на привод растет, т.к. необходимо компенсировать потери энергии на трение. Поскольку обычно измеряется напряжение на приводе, далее для определения расхода энергии на привод используется величина «рост нагрузки привода», выраженная в вольтах. Если температура постоянна, расход энергии на привод пропорционален квадрату роста его нагрузки.
   A2: Амплитуда колебания труб уменьшается, если привод не может обеспечить нужную амплитуду.

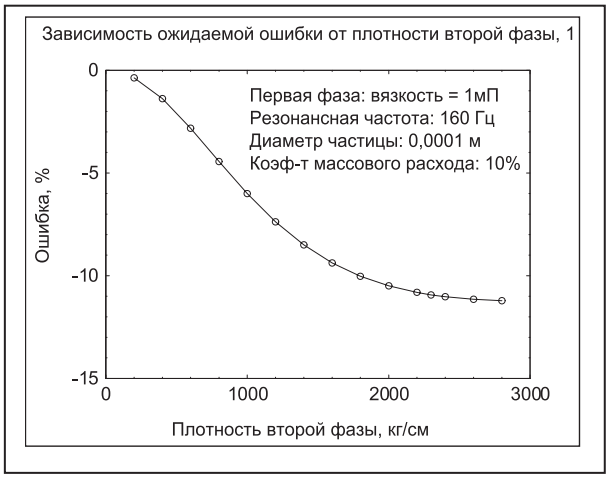
B. Показания массового расхода ниже, т.к. поперечное движение частиц менее активное. Отрицательная добавка пропорциональна числу частиц (количеству второй фазы).

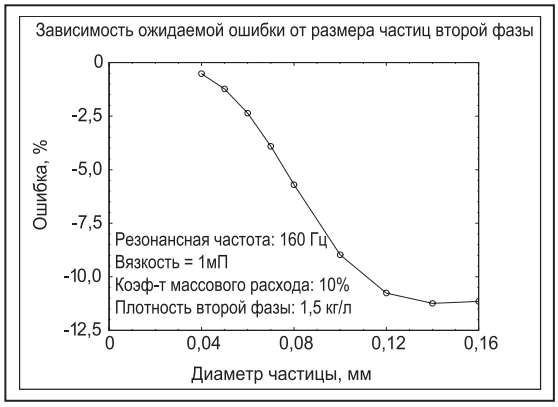
Из этой модели нетрудно сделать вывод, что два эффекта (A и B) зависят от:

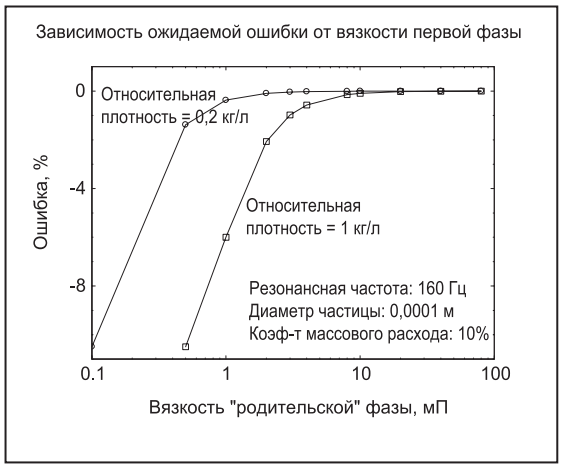
- числа частиц
- коэффициента трения, т.е.
  - размера частицы и
  - вязкости «родительской» фазы
- разности плотностей
- поперечного ускорения, т.е.
  - амплитуды и
  - частоты колебаний.

Последние два аспекта зависят от конструкции. В общем случае можно показать, что измерительные приборы с меньшей резонансной частотой лучше приборов с более высокой резонансной частотой, так как для них поперечное ускорение больше.

Ряд результатов по этим вопросам излагается в приведенной литературе (см. ссылку 1).







В случае систем жидкость/твердое тело для отклонения от заданной точности справедливы следующие утверждения:

- Отклонение отрицательно.
- Отклонение мало, если мал размер частиц.
- Отклонение мало, если разность плотностей двух фаз мала.
- Отклонение мало, если вязкость «родительской» фазы высока.
- Отклонение меньше, если резонансная частота меньше 200 Гц.

Эти утверждения справедливы и для систем жидкость/жидкость, так как они (в нашем случае) ведут себя аналогично системам жидкость/твердое тело.

Ввиду сложности систем нельзя дать точных оценок того, насколько велика будет ошибка.

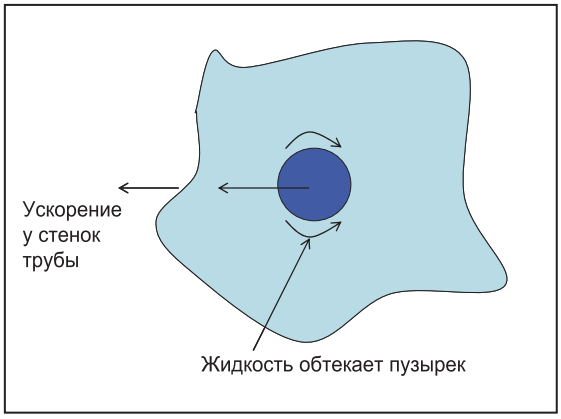
В показаниях плотности также присутствует ошибка, которая здесь не рассматривается.

2. Аэрация

В отличие от твердых частиц (или сгустков жидкости), присутствие пузырьков газа в жидкости часто не входит в планы разработчиков, и пузырьки попадают в жидкость случайно. Поэтому количество газа часто неконтролируемо, и может меняться в пределах от 0 до 100%. При этом кориолисовы расходомеры часто ведут себя непредсказуемо и переходят в сбойное состояние, что, как правило, не может удовлетворить пользователя.

2.1 Модель

Основной принцип аналогичен случаю частицы. Однако здесь среда сама обтекает пузырьки, не приводя к их поперечному ускорению.

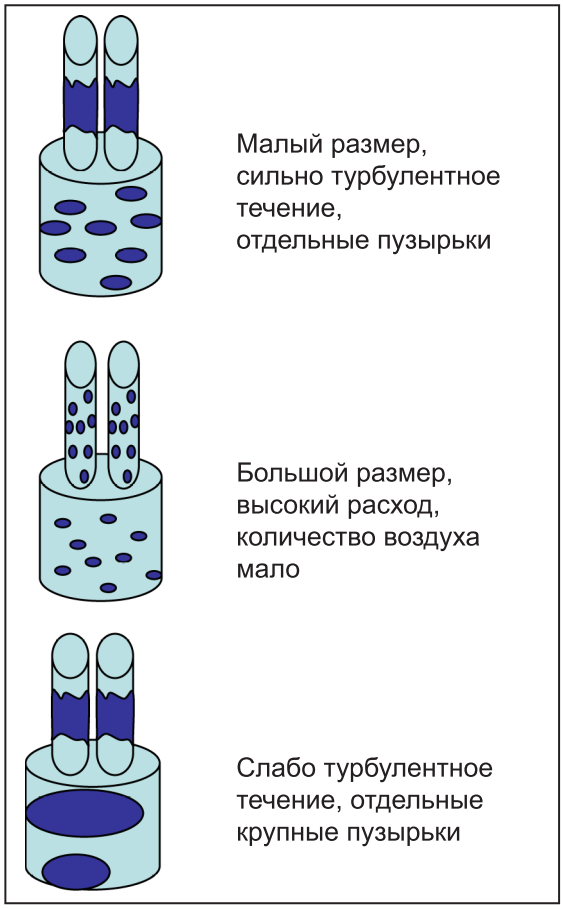


Поэтому прогнозируемые эффекты, в принципе, те же, что и для системы жидкость/ твердые частицы:

A. Большее потребление энергии
B. Заниженные показания

Оба эффекта зависят от размера пузырьков (поверхностного натяжения), вязкости и плотности среды.

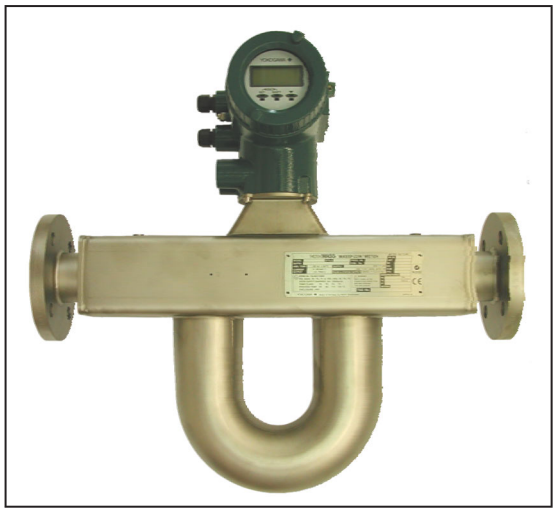
Пузырьки газа могут иметь большой диаметр по отношению к размеру трубы, и этот диаметр зависит не только от поверхностного натяжения, но и от внутреннего давления (которое обычно ниже в кориолисовых трубах, чем в трубах, соединенных с ними, и зависит от расхода), а также от степени турбулентности. Поэтому можно прогнозировать весьма несхожие ситуации (на входных/выходных трубах кориолисовых расходомеров с 2 трубами):



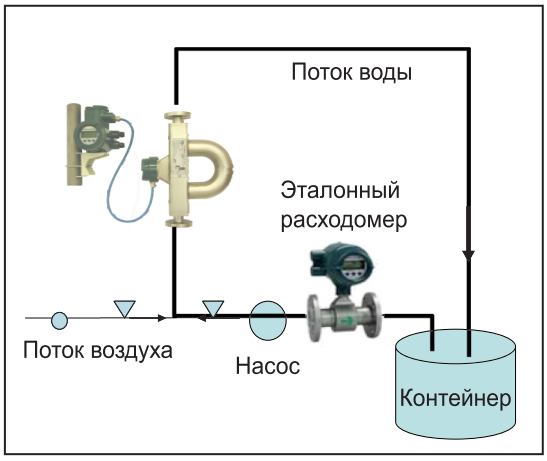
Режимы потока разные в зависимости от расхода и количества газа. Поэтому должна наблюдаться не только сильная зависимость от размера, но и изменение характера движения в зависимости от процента аэрации.

2.2 Экспериментальная установка

Исследуемые кориолисовы расходомеры были изготовлены компанией Иокогава (Rotamass серии 3). Это классические расходомеры с двумя U-образными трубами.



Датчики всегда устанавливались вертикально, чтобы уменьшить неравномерность распределения газа при асимметричной установке.



Расходомеры с размерами, рассчитанными на расход до Qnom = 2.7 т/ч, исследовались на небольшом испытательном стенде в лаборатории. Для расходомеров больших размеров использовалась тестовая установка изготовителя, обеспечивающая большой расход воды. В качестве эталонного расходомера использовалась модель MAG (ADMAG, Иокогава). Газ подавался либо непосредственно перед датчиком, либо за 1,5 м до него. Для среднего размера (RCCS36, Qnom = 9 т/ч) испытания проводились на обеих установках; при этом существенных отличий обнаружено не было. В отдельном эксперименте было установлено, что разделение газа/жидкости в контейнере достаточно эффективно, и аэрированная жидкость не попадает в эталонный расходомер. Как правило, использовалась смесь воздух/вода. В качестве альтернативных текучих сред использовалась мыльная вода и вода с сахаром.

Ввиду столь большого числа различных режимов потока и факторов воздействия потребовалось провести отдельные испытания для всех размеров. Основные результаты приведены ниже:

Таблица 1a

Тип		RCCS30	RCCS31	RCCS32	RCCS33
Qmax	т/ч	0,1	0,3	0,6	1,5
Qnom	т/ч	0,045	0,17	0,37	0,9

Таблица 1b

Тип		RCCS34 RCCT34	RCCS36 RCCT36	RCCS38 RCCT38	RCCS39 RCCT39	RCCS/T 39/IR
Qmax	т/ч	5	15	50	120	300
Qnom	т/ч	2,7	9	32	85	250

Диаметр измерительных труб

Тип		RCCS30	RCCS31	RCCS32	RCCS33
Внутренний диаметр	мм	1,2	2,1	3	4,5
Толщина стенки	мм	0,2	0,25	0,25	0,25

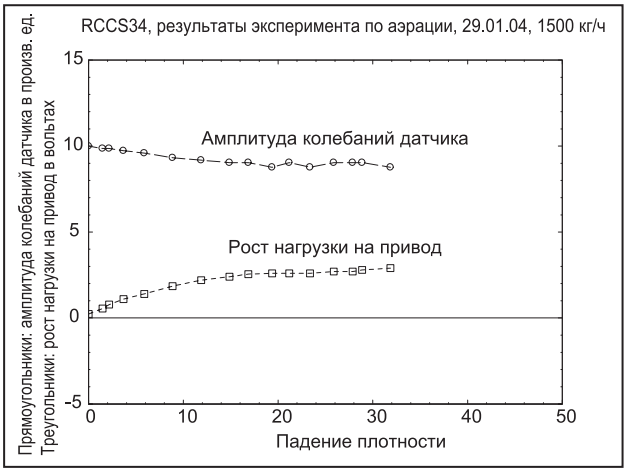
Тип		RCCS34 RCCT34	RCCS36 RCCT36	RCCS38 RCCT38	RCCS39 RCCT39	RCCS39 /IR
Вн.д.	мм	7,6	13,4	22,1	37,2	55,1
Т.ст.	мм	0,9	1,2	1,65	2,6	2,6

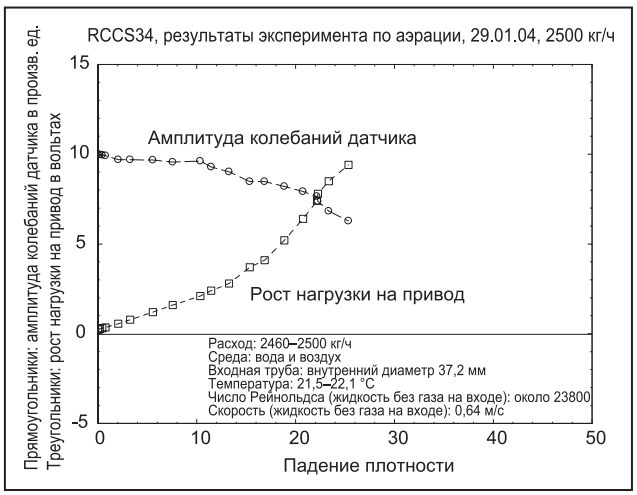
Диапазон частот привода: 100–230 Гц.

2.3 Легко объяснимые результаты: рост нагрузки на привод и падение амплитуды

Для больших размеров потребление энергии в случае аэрированной жидкости может быстро превысить мощность привода. Поэтому амплитуда колебаний труб уменьшается. Данное явление сильно зависит не только от размера и расхода, но и от других параметров текучей среды.

В ходе всех испытаний процент аэрации измерялся по уменьшению плотности (что примерно равно проценту воздуха в трубах, если плотность среды равна 1 кг/л и ошибка измерения плотности мала. В отдельном эксперименте было установлено, что показания плотности обычно в диапазоне нескольких процентов). Если не оговорено обратное, использовалась смесь вода/ воздух.



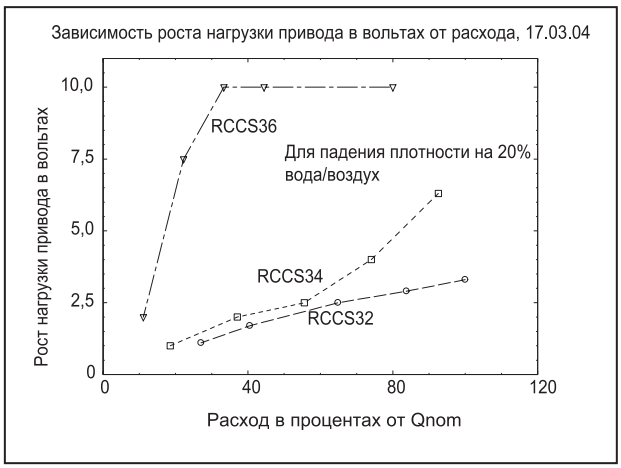


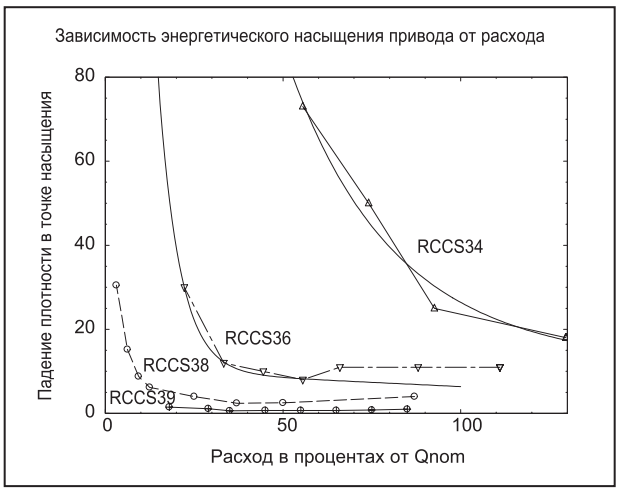
Из приведенных выше графиков видно, что для определенного процента аэрации потребление энергии пропорционально расходу. Это «логично», т.к. чем больше расход, тем большее количество смеси среда/газ (с постоянным процентом аэрации) проходит через расходомер, и тем больше потребляемая мощность.

Наблюдение: аэрация приводит к более серьезным последствиям при высоких расходах.

При внимательном анализе этого факта становится ясно, что проблема обеспечения постоянства амплитуды сложнее при больших размерах. Привод не способен передавать сколь угодно высокую энергию, в нашем случае 10,5 В было его порогом энергетического насыщения.

В случае малых размеров (RCCS33 и менее) для смеси вода/воздух порог никогда не достигался. Чем больше размер, тем выше расход, и тем скорее привод достигает порога энергетического насыщения:





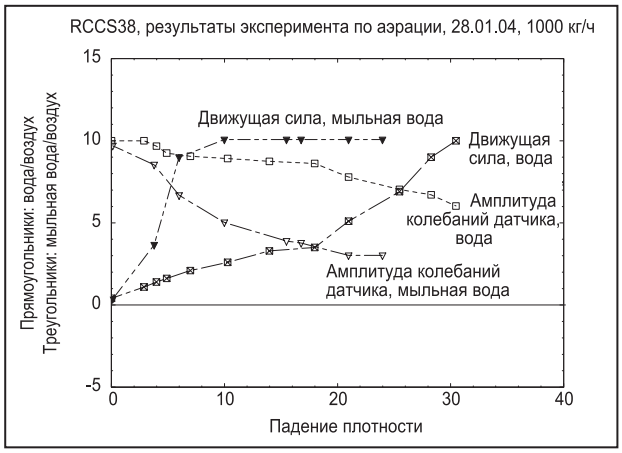
На последнем графике видно, что для модели самого большого размера RCCS39/IR пороговая точка для привода достигается даже при малых расходах, если имеется некоторое количество газа.

Наблюдение: аэрация приводит к более серьезным последствиям при больших размерах.

Амплитуда колебания труб уменьшается с увеличением процента аэрации даже до момента достижения порога передачи энергии. Но если процент аэрации будет продолжать расти при

достижении этого порога (т.е. когда расход энергии на привод станет постоянным) амплитуда резко снизится и может упасть почти до нуля.

Приведенные выше кривые характерны только для смеси вода/воздух. Для других смесей потребление энергии может быть больше или меньше. Ниже сопоставляются кривые для воды и мыльной воды (с меньшим поверхностным натяжением и меньшим размером пузырьков):



Наблюдение: для сред с меньшим поверхностным натяжением (жидкость/ газ) возникает больше проблем.

2.4 Установка DSP на отключение

Обычно кориолисов преобразователь игнорирует слишком слабые колебания труб. В отсутствие аэрации малые амплитуды указывают на то, что случилась какая-то неполадка: повреждена катушка, произошло короткое замыкание, есть повреждения ввиду коррозии, или продукт мешает свободному движению труб. При этом DSP (цифровой процессор сигналов) обнаружит неполадку и остановит работу.

В случае аэрации (большой размер, большой расход, высокий процент аэрации) такой сбойный режим может вызвать отказ преобразователя, и у заказчика могут возникнуть проблемы.

Для моделей Rotamass хорошим компромиссом между допуском на аэрацию и порогом оповещения о сбое является установка DSP на отключение на уровне 2,5% нормального значения вибрации. При такой установке возможна успешная работа в большинстве ситуаций, возникающих вследствие аэрации. В более серьезных случаях можно использовать специальные функции ПО, о чем пойдет речь ниже.

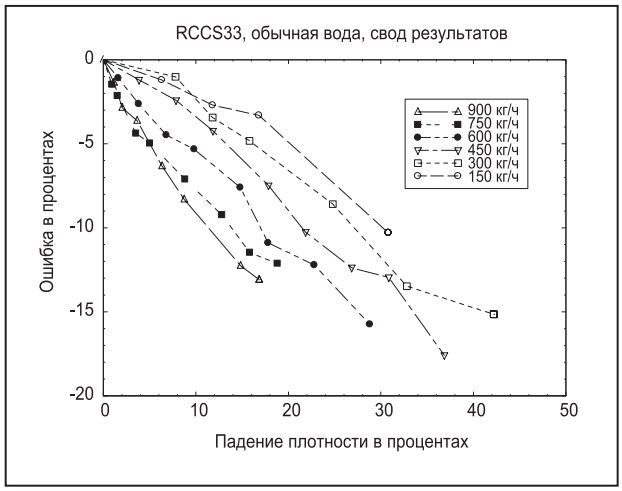
Для смеси вода/воздух порог отключения DSP вычисляется и задается в GS при расходе 50% от Qnom. Это уровень постоянной аэрации без отключения DSP (погрешность рассматривается ниже):

RCCS30-34: нет ограничений
RCCS36: более 50% воздуха
RCCS38: около 30% воздуха
RCCS39: около 7% воздуха
RCCS39/IR: около 3% воздуха

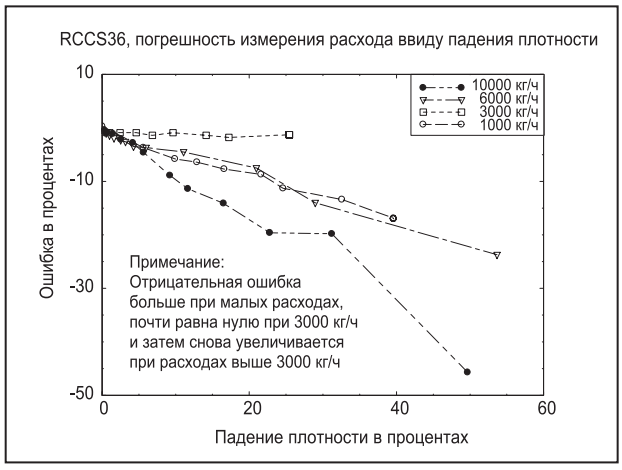
Для текучих сред с другими значениями поверхностного натяжения допустимые концентрации газа будут иными.

3. Точность

Как отмечено в первом разделе, прогнозируется линейная зависимость погрешности измерений от количества газа (см. также ссылки 2 и 5). Это было проверено в случае малых размеров.

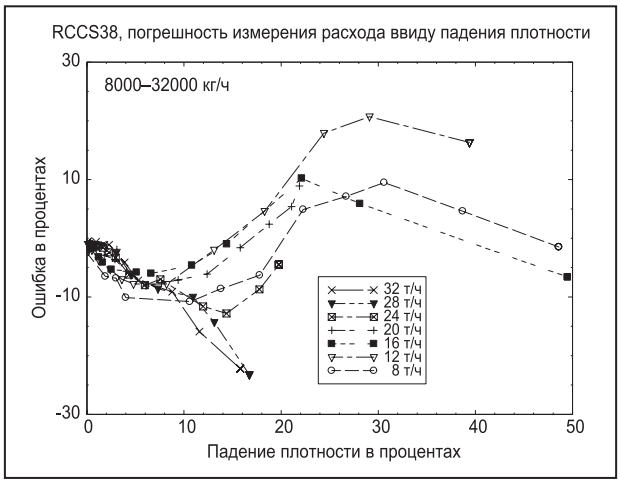


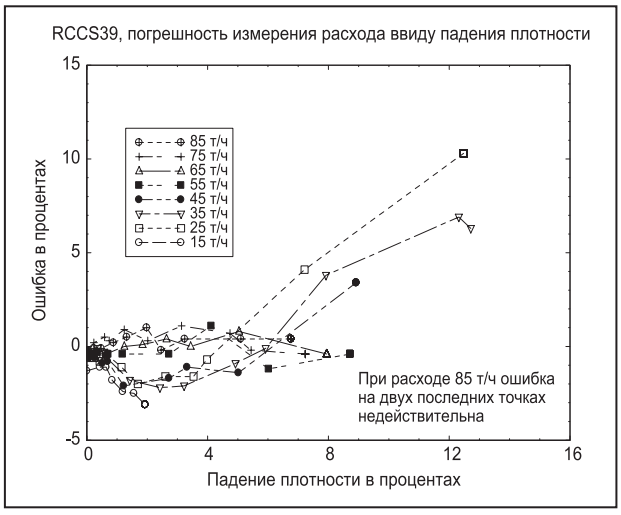
Однако когда размер пузырьков в воде, текущей по расходомерным трубам (равный от 5 до 15 мм), становится меньше диаметра трубы, картина изменяется. Например, для модели RCCS36 ошибка минимальна при расходе 3000 кг/ч:

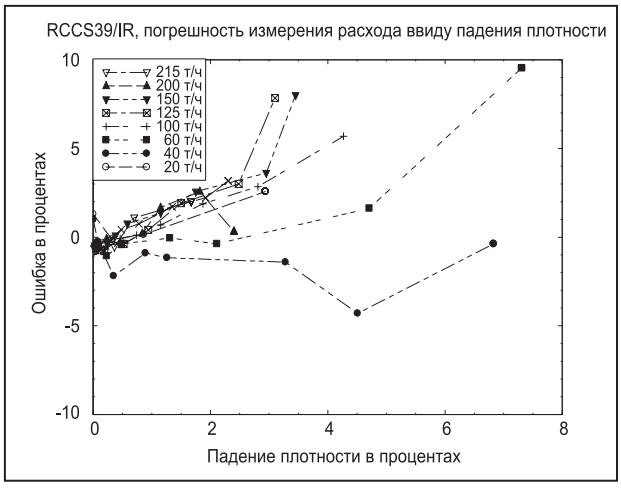


Если размер больше, чем у RCCS36, для больших расходов знак ошибки становится положи-

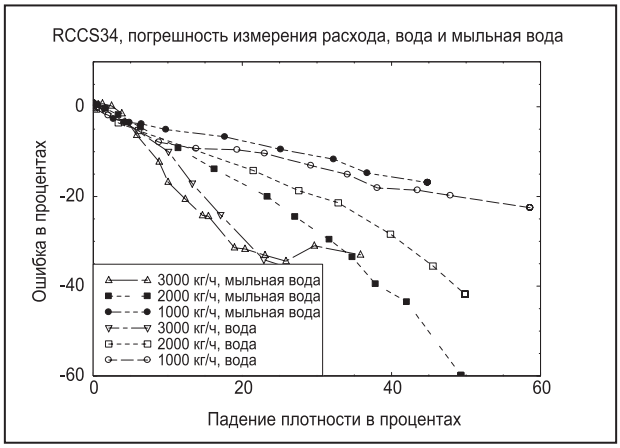
тельным. Это также отмечалось Grumski и Bajura (см. ссылку 3) и другими авторами.





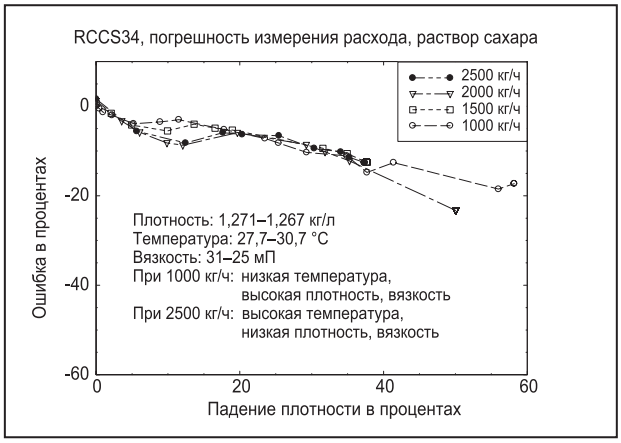


Обсуждаемую ошибку нельзя рассматривать как случайную. Если размеры пузырьков меняются, картина все равно остается такой же, но значение ошибки может быть в 2 раза больше или меньше. Проводились испытания с мыльной водой и волоконным фильтром, установленным перед датчиком и служившим для образования небольших пузырьков. При этом были обнаружены существенные расхождения в ошибках по сравнению со случаем обычной воды.



Измерения с мыльной водой в случае больших размеров очень сложны. Несложный эксперимент показал, что содержание мыла здесь влияет сильнее, чем при меньших размерах.

Ожидается также большой вклад вязкости:



При сравнении ошибок в случае воды и мыльной воды видно, что ошибка при высокой вязкости гораздо меньше (как и предсказывается теорией), и эта ошибка слабо зависит от расхода.

Выводы. Ошибка в значении расхода, обязанная наличию газа в жидкости, может быть предсказана лишь очень грубо, если диаметр труб меньше размера пузырьков. Это отрицательная ошибка, величина которой растет с увеличением содержания газа. Для больших размеров ошибка становится положительной. При высокой вязкости ошибка существенно меньше. Кроме того, на значение ошибки могут повлиять и другие факторы (размер входной трубы, тип монтажа и т.д.).

4. Анализ динамики и рекомендации

Как показывают исследования, последствия аэрации в кориолисовых расходомерах не контролируемы в диапазоне расходов, используемых на производстве (в случае средних или больших размеров). Поэтому постоянной аэрации следует избегать. Если это невозможно, точность измерения будет плохой, и вместо таких расходомеров могут быть более приемлемы расходомеры других типов (например, магнитные или вихревые). Однако если аэрация кратковременная, можно предложить ряд мер для разрешения возникающих проблем или смягчения их серьезности.

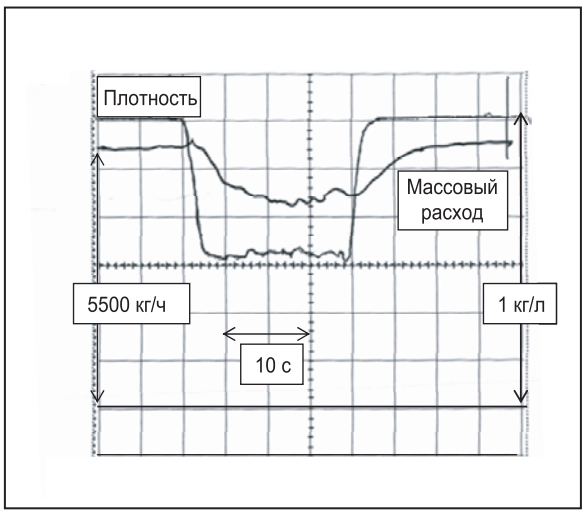
4.1. Начало закачки по пустой трубе

Если автоцистерны на пункте налива заполняются различными текучими средами, аэрации трудно избежать. Если уровень среды повышается при протекании через расходомер (при вертикальном монтаже), сложностей вообще не возникает, однако если конструкция заправочной колонки не приспособлена для быстрой смены газообразной и жидкой фаз, некоторое время по трубе будет протекать смесь жидкости и газа.

Есть простой рецепт минимизации проблем в начале закачки: нужно поддерживать расход на достаточно низком уровне, пока газ не выйдет из системы. Если расход мал, будут малы оценочная ошибка и потребление энергии (при движении среды), так что порог DSP на отключение не будет достигнут.

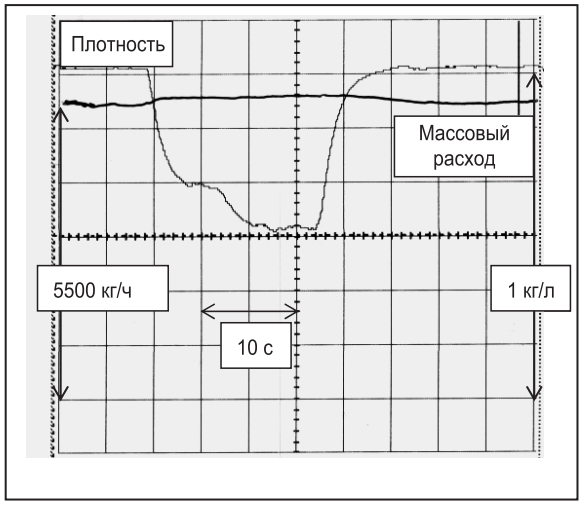
4.2. Спонтанное образование пузырьков

Спонтанное образование пузырьков газа в текучей среде может быть вызвано различными факторами: техпроцессом, низким уровнем в резервуаре и т.д. Типичная картина иллюстрируется для модели RCCS36 при расходе 61% от Qnom (5,5 т/ч, постоянный расход). На несколько секунд в поток вводится высокий процент газа (50%). Время затухания при измерении плотности равно 0,1 с, при измерении расхода – 3 с. Система не достигает порога DSP на отключение.



Сначала можно наблюдать небольшое положительное отклонение, обязанное ускорению столба воды воздухом, а затем, согласно ожидаемому, отклонение становится отрицательным. При этом массовый расход почти постоянен. Однако в том же эксперименте с расходомером RCCS38 ошибки были очень малы, в согласии с ошибками в испытаниях при постоянной аэрации.

Для устранения ошибки при измерении массового расхода в моделях серии Rotamass предусмотрена функция (обнаружение пробок) для поддержания массового выхода постоянным в присутствие газовых пузырьков. На приведенном ниже графике иллюстрируется установка: "slug alarm: applied/сигнализация пробок: включено", "slug criteria: 0.7V/критерий обнаружения пробок: 0.7 В", "slug duration: 0s/ время прохода пробок: 0 с", "after slug: hold/ после прохода: удержание". При пробковом течении выход постоянный, и ошибка мала.



Тем не менее, если амплитуда колебаний трубы столь мала, что достигается порог DSP на отключение, выход попадает в область ошибок. Однако если включена функция сигнализации пробок, ошибки не повлияют на выход, так что эта функция Rotamass весьма полезна при спонтанном образовании пузырьков.

5. Обобщение результатов

Опубликованные результаты относятся только к серии Rotamass и не могут легко экстраполироваться на другие конструкции и марки расходомеров. Схожая картина должна наблюдаться для расходомеров с 2 U-образными трубками с резонансной частотой ниже 200 Гц. Однако в литературе сообщалось об ошибках, которые мы не наблюдали:

Рис. 3. Типичные результаты испытаний и сравнение с моделью пузырьков

Например, нами не наблюдалась недавно опубликованная зависимость (см. ссылку 4), которая, по утверждению авторов, является типичной, и для которой в диапазоне падения плотности 0–65% была измерена ошибка от –100% до +200%. Это говорит о том, что для каждой конструкции расходомера картина в определенной степени уникальна. Данный факт, кроме того, подтверждается описанной выше аномалией для модели RCCS36. Другое подтверждение – уменьшение погрешности измерений с увеличением расхода, отмеченное в ссылке 2 (в нашем случае для малых размеров ошибка возрастала с увеличением расхода)!

Снижение ошибки при увеличении вязкости должно быть характерно для всех конструкций расходомеров данного класса.

На рынке имеются расходомеры с одной трубой, частота возбуждения которой высока (до 1000 Гц). Недавно были опубликованы результаты испытаний (см. ссылку 6) расходомера с одной прямой трубой, внутренний диаметр которой был равен примерно 25 мм. Отрицательная ошибка возрастала пропорционально содержанию воздуха, как и ожидается из общих соображений. Учитывая, что в высокочастотных измерительных приборах поперечное ускорение велико, можно предположить, что в таких приборах смеси газа и жидкости будут вести себя совсем по-другому, и, вероятно, будет наблюдаться иной набор их характеристик.

Ссылки

[1] **Jörg Andreas Gregel:** "Möglichkeiten und Grenzen der Coriolis-Massendurchflußmeßtechnik", Erlangen, 2001

[2] **Manus Henry:** "Self-validating digital Coriolis mass flow meter" (Массовый цифровой кориолисов расходомер с функцией самопроверки), Computing and Control Engineering journal, October 2000

[3] **Grumski, J.T. and Bajura,R.A.:** "Performance of a Coriolis-Type Mass Flow Meter in the Measurement of Two-Phase (Air-Liquid) Mixtures" (Рабочие характеристики кориолисовых массовых расходомеров при измерениях для двухфазных смесей воздух/жидкость)
Proceedings of the 1984 ASME Winter Meeting: Mass Flow Measurement

[4] **J.Hemp and H.Yeung:** "Coriolis meters in 2 phase conditions" (Кориолисовы расходомеры в случае двух фаз), IEE computing and control Engineering journal, August/September 2003

[5] **J.Hemp and G.Sultan:** "On the Theory and Performance of Coriolis mass flowmeters" (О теоретических аспектах и рабочих характеристиках кориолисовых массовых расходомеров)
Proceedings of the International Conference on Mass Flow Measurement Direct and In direct; IBC Technical Services, London, February 1989

[6] Y. Hussain: "Single straight tube mass flowmeter using "Adaptive Sensor Technology AST" (Массовый расходомер с одной прямой трубой на базе технологии «адаптивных датчиков» AST), VDI Berichte, Nr. 1829, 2004