

УДК 621.6

**РАЗРАБОТКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
КОРИОЛИСОВОГО РАСХОДОМЕРА**

Е.А. Баландин, Т.Н. Баландина

Томский политехнический университет

E-mail: balaniva@sibmail.com

Баландин Евгений Александрович, магистрант кафедры точного приборостроения, Института неразрушающего контроля ТПУ.
E-mail: balaniva@sibmail.com
Область научных интересов: расходомерия.

Баландина Татьяна Николаевна, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.
E-mail: error.balandina@yandex.ru
Область научных интересов: расходомерия.

В статье содержится информация о разработке чувствительного элемента кориолисового расходомера с прямой трубкой. Кориолисовые расходомеры имеют широкое применение в нефтегазовой, нефтехимической и других отраслях промышленности из-за их способности измерять массовый расход. Результатом данной работы явились расчеты параметров трубы расходомера и рабочие частоты.

Ключевые слова:

Массовые расходомеры Кориолиса, эффект Кориолиса, сила Кориолиса, топлива, массовый расход.

В связи с развитием рыночной экономики возникает необходимость реорганизации системы учета сырьевых и продуктовых потоков. Все потоки по своему типу, например на нефтеперерабатывающем заводе, можно разделить на: входящие (сырье на завод), внутрицеховые, межцеховые, выходящие (продукция с завода). Возрастающие требования к качеству измерения расхода на узлах коммерческого учета вызывают необходимость замены ряда устаревших приборов на более современные. Причем они должны удовлетворять ряду качественных критериев: измерение массового расхода, плотности, температуры, наличие компьютерного интерфейса, удобство монтажа и эксплуатации. Приборы, отвечающие этим требованиям, относятся к прямому методу измерения массы продукта. Таким прибором является кориолисовый массовый расходомер. Он обладает более высокой точностью, чем все остальные расходомеры, имеет ряд преимуществ перед объемными расходомерами. В первую очередь это измерение массового расхода напрямую. Это особенно важно на химическом производстве, где необходим точный учет жидкостей. Измерение массового расхода исключает необходимость перевода объемного расхода в массовый, путем вычисления.

Целью данной работы является разработка конструкции кориолисова массового расходомера с прямой трубкой. В основе принципа измерения расходомеров лежит эффект Кориолиса. Массовый расход определяется путем измерения временной задержки между сигналами детекторов, которая пропорциональна массовому расходу. При отсутствии потока измеряемой среды изгиба трубки не происходит и выходной сигнал отсутствует. Как показано в [1, 2], резонансная частота трубки зависит от ее геометрии, материала, конструкции и массы. Масса состоит из двух частей: массы самой трубки и массы измеряемой среды в трубке. Масса трубок постоянна для данного датчика. Поскольку масса среды в трубке равна произведению плотности среды и внутреннего объема трубки, а объем трубки является константой для данного типоразмера датчика, то резонансная частота колебаний трубки может быть привязана к плотности среды и определена путем измерения резонансной частоты колебаний, периода колебаний трубки и температуры (изменение модуля упругости материала трубки при изменении температуры учитывает температурный сенсор).

Основными элементами датчика расхода являются две трубки (рис. 1): опорная и расходомерная, на которых монтируются:

- соединительная коробка с силовой электромагнитной (задающей) катушкой возбуждения и магнитом;

- два тензодатчика с магнитами и электромагнитными катушками;
- терморезистор.

Элементы датчика закрыты защитным кожухом, на котором нанесен указатель направления потока.

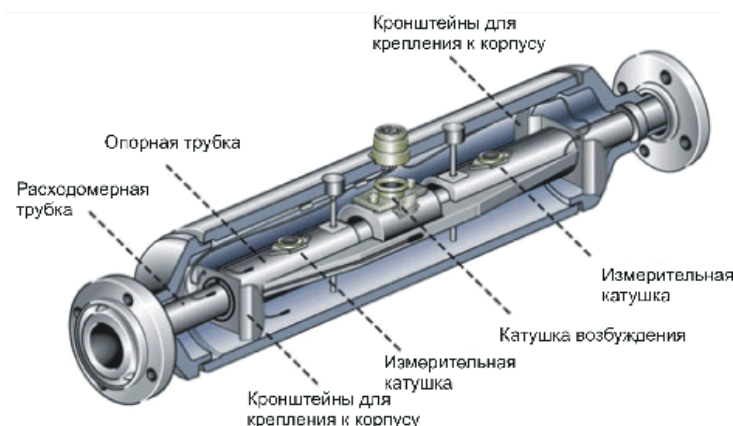


Рис. 1. Устройство Кориолисового расходомера

Расходомерная трубка внутри корпуса датчика колеблется с собственной частотой. Привод заставляет трубку вибрировать. Электромагнитный привод состоит из катушки, соединенной с опорной трубкой, и из магнита, соединенного с расходомерной трубкой. На катушку подается переменный ток, который заставляет магнит периодически то притягиваться, то отталкиваться.

Рассмотрим подробнее это явление. На проводник с током, которым является катушка, в магнитном поле (магнит) действует сила Ампера, равная произведению силы тока на векторное произведение элемента длины проводника на магнитную индукцию поля:

$$dF = I[dl, B],$$

где dF – элементарная сила Ампера; I – сила тока; dl – элемент длины проводника; B – индукция магнитного поля.

Поскольку магнит и катушка жестко закреплены на разных трубках, то сила будет отталкивать и притягивать трубки друг от друга или друг к другу. Необходимым условием является наличие переменного тока в катушке, т. к. сила должна менять направление. Датчик может определить положение, скорость или ускорение трубок. Если используются электромагнитные датчики, магнит и катушка в датчике меняют свое положение друг относительно друга, во время того, как трубки вибрируют, вызывая изменение в магнитном поле катушки. Поэтому синусоидальное напряжение на катушке представляет собой движение трубок.

Принцип действия электромагнитного датчика основан на явлении электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1821 г. Это явление заключается в возникновении индукционного тока. При движении катушки в постоянном магнитном поле или движении магнита (сердечника) внутри неподвижной катушки. Индукционный ток направлен по правилу Ленца, которое говорит, что индукционный ток имеет такое направление, чтобы его собственное магнитное поле противодействовало изменению магнитного потока. Закон Фарадея: э.д.с электромагнитной индукции в контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ_m сквозь поверхность контура:

$$E_{\text{инд}} = -d\Phi_m / dt.$$

Когда поток отсутствует и происходит вибрация, различия в показаниях двух датчиков в точках B_1 и B_2 отсутствуют (рис. 2). Если есть поток жидкости и привод создает вибрацию трубки, то силы Кориолиса создают вторичную изгибающую вибрацию, которая проявляется в небольшой разнице фаз относительного движения трубки. Это обнаруживается датчиками в двух точках. Отклонение трубки, вызываемое силой Кориолиса, имеет место только в том слу-

чае, когда одновременно присутствует поток жидкости и вибрация трубок. Вибрация без потока или поток без вибрации не дают каких-либо показаний прибора. При одновременном снятии сигналов происходит смещение по фазе на ΔT . Это относительное запаздывание прямо пропорционально массовому расходу.

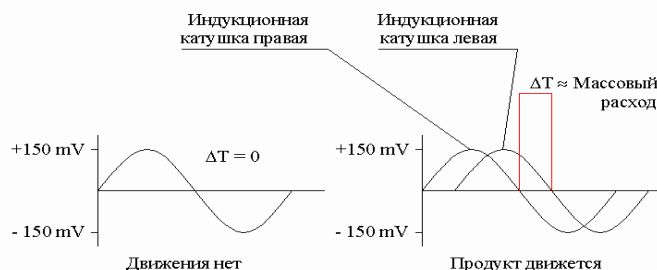


Рис. 2. Сигналы при отсутствии и наличии расхода

Естественная резонансная частота двухтрубной конструкции зависит от геометрии, конструктивных материалов и массы всей конструкции (массы трубок и массы жидкости внутри трубок). Масса трубы постоянна. Так как масса жидкости есть ее плотность (D), умноженная на объем (который также постоянен), частота вибрации может быть обусловлена плотностью протекающей жидкости. Следовательно, плотность жидкости может быть определена путем измерения резонансной частоты колебаний трубок (заметим, что плотность жидкости может быть определена и в отсутствие потока, пока трубки заполнены жидкостью и колеблются).

Толщина стенок трубок меняется значительно от модели к модели, но, тем не менее, даже самая крепкая трубка будет иметь толщину меньше, чем у трубопровода. Конструкции с большой толщиной стенки трубы и высокими скоростями потока требуют применение особых материалов из-за возникновения эрозии. Кориолисов расходомер должен быть сделан из особых материалов, так как он подвергается коррозии, а также для предотвращения питтинга. Для трубопроводов обычно используются углеродистые и нержавеющие стали, так как допускается небольшое количество питтинга. Для расходомера даже незначительное количество питтинга недопустимо, так как стенки тонкие, а питтинг порождает концентрацию напряжений в конструкции, что может привести к ее разрушению. Поэтому стандартные таблицы коррозии (основанные на критерии потери веса) не годятся при выборе материалов для Кориолисова расходомера, и это должно быть учтено производителем. Сила Кориолиса определяется соотношением:

$$F_K = 2 \cdot M_r \cdot V_r \cdot \omega,$$

где F_K – сила, действующая со стороны жидкости на трубку благодаря ускорению Кориолиса.

Труба расходомера изготавливается из титанового сплава BT16 [3]. Титан BT16 относится к высокопрочным одной системы с титаном марки BT14, но отличается от последнего меньшим содержанием алюминия. В связи с этим сплав BT16 хорошо деформируется не только в горячем, но и в холодном состоянии. Хотя из сплава BT16 можно изготавливать почти все виды полуфабрикатов, основная часть продукции из него – проволока и прутки малых диаметров, полученные прокаткой или волочением. Это связано с тем, что сплав BT16 предназначен в основном для изготовления деталей крепления.

К структуре прутков, предназначенных для изготовления деталей крепления, предъявляются довольно строгие требования: она должна быть мелкозернистая и однородная. Помимо этого, предъявляются повышенные требования к геометрическим размерам прутков и качеству их поверхности. Состав сплава BT16 имеет хорошую свариваемость и высокую пластичность сварного соединения непосредственно после сварки. Сплав BT16 применяют в отожженном и термически упрочненном состояниях. Тонкостенные трубы, листы и детали из них отжигают при температурах 680...790 °С, а прутки, толстостенные трубы и профили – при 770...790 °С. Для термического упрочнения сплав закалывают при температурах 780...830 °С и затем подвергают старению при 560...580 °С в течение 4–10 ч. Сплав в закаленном и состаренном состоянии с временным сопротивлением разрыву 1200 МПа мало чувствителен к концентраторам напряжений, надрезу, перекоосу. Химический состав сплава BT16 приведен в таблице.

Таблица. Химический состав сплава ВТ16

C	Ti	Fe	Mn	Mo	V	N	Al	Si	Zr	O
до 0,1	82,885–89,7	до 0,25	1–2,0	4,5–6,5	4–5,5	до 0,05	1,8–3,8	до 0,15	до 0,3	до 0,15

Расчеты параметров трубки произведены по СА 03-003-07 «Стандарт ассоциации. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов» [4]. Допускаемое напряжение $[\sigma]$ при расчете труб и соединительных деталей трубопровода на статическую прочность:

$$[\sigma] = \min\left(\frac{\sigma_m}{2,4}, \frac{\sigma_{p0,2}}{1,5}\right) = \min\left(\frac{1000}{2,4}, \frac{320}{1,5}\right) = 213,3(\text{МПа}),$$

где σ_m – временное сопротивление разрыву соответственно при расчетной температуре и 20 °С, $\sigma_m = 1000$ (МПа), $\sigma_{p0,2}$ – условный предел текучести при остаточной деформации 0,2 %, соответственно при расчетной температуре и 20 °С, для данной марки стали $\sigma_{p0,2} = 300$ (МПа).

Допустимое внутреннее избыточное давление:

$$P = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_y \cdot (s - c)}{D - (s - c)} = \frac{2 \cdot 213,3 \cdot 1 \cdot (0,5 - 0,22)}{15 - (0,5 - 0,2)} = 8,118(\text{МПа}),$$

где ϕ_y – коэффициент прочности элемента со сварным швом при растяжении, для бесшовных труб он равен 1; s – наименьшая номинальная толщина стенки, данная величина равна 0,5 мм; c – коэффициент усреднения компенсационных напряжений, 0,22 мм; D – наружный диаметр трубки, по заданию он равен 15 мм.

Расчетная толщина стенки трубы, нагруженной внутренним избыточным давлением:

$$S_R = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \phi_y \cdot [\sigma] + P} = \frac{8,118 \cdot 15}{2 \cdot 1 \cdot 213,3 + 8,118} = 0,28(\text{мм}).$$

Номинальная толщина стенки элемента $[s]$ определяется с учетом прибавки c :

$$[s] = S_R + c = 0,28 + 0,5 = 0,78 \approx 1(\text{мм}),$$

где c – суммарная прибавка к толщине стенки, равна 0,5.

Расчет длины пролета трубопровода:

$$l_{cp} = \sqrt{\frac{12 \cdot W \cdot [\sigma] \cdot \phi_w}{q}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 153,9 \cdot 210,5 \cdot 0,6}{1,1}} = 399,9(\text{мм}) = 400(\text{мм}),$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение от веса трубопровода, МПа.

В рабочем состоянии допускаемое напряжение составляет:

$$[\sigma_c] = 1,1 \cdot [\sigma] - \frac{P_{\text{раб}} \cdot (D - 2 \cdot s)^2}{4 \cdot (D - 2 \cdot s) \cdot s} = 1,1 \cdot 213,3 - \frac{8 \cdot (15 - 2)^2}{4 \cdot (15 - 1) \cdot 1} = 210,5(\text{МПа}),$$

где $[\sigma_c]$ – допускаемое напряжение при расчете труб и соединительных деталей трубопровода на статическую прочность; $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление, равное 8 МПа; D – наружный диаметр трубы, равен 15 мм; s – номинальная толщина стенки трубки, равна 1 мм; W – момент сопротивления поперечного сечения при изгибе, мм³:

$$W = \frac{\pi}{4} \cdot (D - s)^2 \cdot s = \frac{3,14}{4} \cdot (15 - 1)^2 \cdot 1 = 153,9(\text{мм}^3),$$

где q – расчетная погонная нагрузка от собственного веса трубопровода в рабочем состоянии или в состоянии испытаний, равна 1,1 МПа (определяется в соответствии с разделом 2.1 СА 03-003-07); ϕ_w – коэффициент прочности элемента с поперечным сварным швом при изгибе бесшовных труб равен 0,6.

Рассчитаем массу трубы. Для жидкости с плотностью $\rho_{\text{ож}} = 0,5 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$:

$$m = \pi \cdot \rho_0 \cdot s \cdot (D - s) \cdot l = 3,14 \cdot 5,01 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot (15 - 1) \cdot 10^{-3} \cdot 40000 \cdot 10^{-3} = 0,103(\text{кг}),$$

где D – наружный диаметр трубы, мм; l – длина трубы, равная 0,4 м; s – номинальная толщина стенки трубки, равна 1 мм; ρ_0 – сумма плотностей материала трубы и измеряемой жидкости, равна:

$$\rho_0 = \rho_{0ж} + \rho_{0г} = 0,5 \cdot 10^3 + 4,51 \cdot 10^3 = 5,01 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3).$$

Для жидкости с плотностью $\rho_0 = 1,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$:

$$m = \pi \cdot \rho_0 \cdot s \cdot (D - s) \cdot l = 3,14 \cdot 9,35 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \cdot (15 - 1) \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^{-3} = 0,122 (\text{кг}),$$

где ρ_0 – сумма плотностей материала трубы и измеряемой жидкости, равна:

$$\rho_0 = \rho_{0ж} + \rho_{0г} = 1,5 \cdot 10^3 + 4,51 \cdot 10^3 = 6,01 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3).$$

В [5] Приведен расчет момента инерции прямого тонкого однородного стержня относительно оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно продольной геометрической оси симметрии (рис. 3).

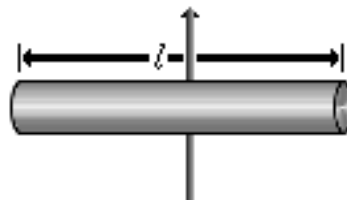


Рис. 3. Тонкий стержень

Пусть ось вращения проходит через центр масс стержня, тогда:

$$I = \frac{1}{12} \cdot m \cdot L^2,$$

где L – длина стержня.

Для труб расходомера момент инерции с плотностью жидкости $\rho_1 = 0,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$

$$I = \frac{1}{12} \cdot 0,103 \cdot 0,40^2 = 0,00182 (\text{кг} \cdot \text{м}^2).$$

Для труб расходомера момент инерции с плотностью жидкости $\rho_2 = 1,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$

$$I = \frac{1}{12} \cdot 0,122 \cdot 0,40^2 = 0,00215 (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$$

Для трубопровода, рассматриваемого как стержень с постоянным поперечным сечением на двух опорах, собственная частота f_j , соответствующая j -той форме собственных колебаний (в данном случае $j = 1$):

$$f_j = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K_j^2}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}},$$

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{1,76^2}{0,4^2} \sqrt{\frac{11 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 \cdot 0,00182}{0,103}} = 10,27 (\text{Гц}),$$

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \frac{1,76^2}{0,4^2} \sqrt{\frac{11 \cdot 10^{-4} \cdot 10^6 \cdot 0,00215}{0,122}} = 10,26 (\text{Гц}),$$

где K_j – j -тый корень частотного уравнения, для данной формы труб он равен 1,76 [3]; L – длина трубы, равна 0,46 м; E – модуль упругости равен 11×10^{-4} МПа при 20 °С; I – момент инерции, для труб расходомера момент инерции с плотностью жидкости $\rho_1 = 0,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$ равен 0,00182 (кг · м²).

Для труб расходомера момент инерции с плотностью жидкости $\rho_2 = 1,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$ равен 0,00215 (кг · м²), m – масса трубы, для жидкости с плотностью жидкости $\rho_1 = 0,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$ равна 0,103 кг, с плотностью жидкости $\rho_2 = 1,5 \cdot 10^3 (\text{кг} / \text{м}^3)$ – 0,122 кг.

Кориолисов датчик с прямой трубкой состоит из следующих частей:

- Расходомерная трубка – труба из сплава на основе титана ГОСТ 22897-86 «Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплавов на основе титана. Технические условия».
- Опорная трубка – работает как вторая расходомерная трубка и служит местом установки катушки возбуждения и измерительных катушек. Когда расходомерная трубка отклоняется вниз, опорная трубка поднимается вверх.

Материал должен быть не магнитным: сталь А2 (08Х18Н10) ГОСТ 7350-77 «Сталь коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия». Кронштейны для крепления к корпусу фиксируют измерительную систему (расходомерную трубку и опорную трубку) на корпусе (материал – сталь 30 ГОСТ 2591-71 «Прокат стальной горячекатаный»).

Катушка возбуждения вместе с магнитом используется для генерирования колебаний опорной и расходомерной трубок датчика. Катушка возбуждается для поддержания вибрации трубок с их собственной частотой.

В конструкцию кориолисовых датчиков с прямой трубкой входят измерительные катушки, расположенные на опорной трубке, и магниты, расположенные на расходомерной трубке. Эти электромагнитные детекторы вырабатывают сигнал, отражающий скорость и положение в данной точке на вибрирующей трубке. Массовый расход определяется расчетом разности фаз этих сигналов. Терморезистор соединен непосредственно с расходомерной трубкой и измеряет температуру технологической текучей среды, проходящей через расходомерную трубку. Терморезистор корректирует разницу температур между корпусом и расходомерной трубкой. Такой измерительный контур обеспечивает точное измерение потока и плотности в условиях меняющейся температуры.

Корпус или оболочка защищает электронику и электрические схемы от внешней коррозии, обеспечивая дополнительную (вторичную) защиту от технологической текучей среды. Некоторые корпуса могут иметь устройства для прочистки, в соответствии с особыми требованиями при специальных применениях прибора. В качестве материала для корпуса используется Сталь 30 ГОСТ 2591-71, технологическое соединение: фланцевое ГОСТ 9399-81 «Фланцы стальные резьбовые. Технические условия».

В состав конструкции расходомера с прямой трубкой входят: расходомерная трубка, опорная трубка, катушка возбуждения и магнит, две измерительные катушки с магнитами, терморезистор, корпус, кронштейны для крепления к корпусу, технологическое соединение, боковые крышки. Общий вид конструкции кориолисового расходомера с прямой трубкой представлен на сборочном чертеже (рис. 4).

Все компоненты подобраны и разработаны в соответствии с требованием работоспособности расходомера и рабочему диапазону температур. Разработанная конструкция чувствительного элемента кориолисова расходомера позволяет измерять массовый расход следующего диапазона плотностей жидкостей: $(0,5-1,5) \cdot 10^3 \text{ г/см}^3$.

В данной работе был спроектирован технологический процесс изготовления кориолисового массового расходомера с прямой и изогнутой трубками, для чего были произведены расчеты параметров трубок, произведен выбор элементов, составлена принципиальная схема.

Преимущество расходомеров с прямой трубкой:

- имеют меньшую вероятность засорения, и трубка легче очищается (может быть очищена механически);
- используются в санитарных условиях, т. к. обладают требованием самозаполнения;
- используются для жидких растворов и других многофазных жидкостей;
- выдерживают большие напряжения трубы и вибрацию;
- легко устанавливаются, требуют меньшего перепада давления;
- более компактны и требуют меньше места для установки;
- используются при измерении жидкости, которая может затвердеть при определенной температуре.

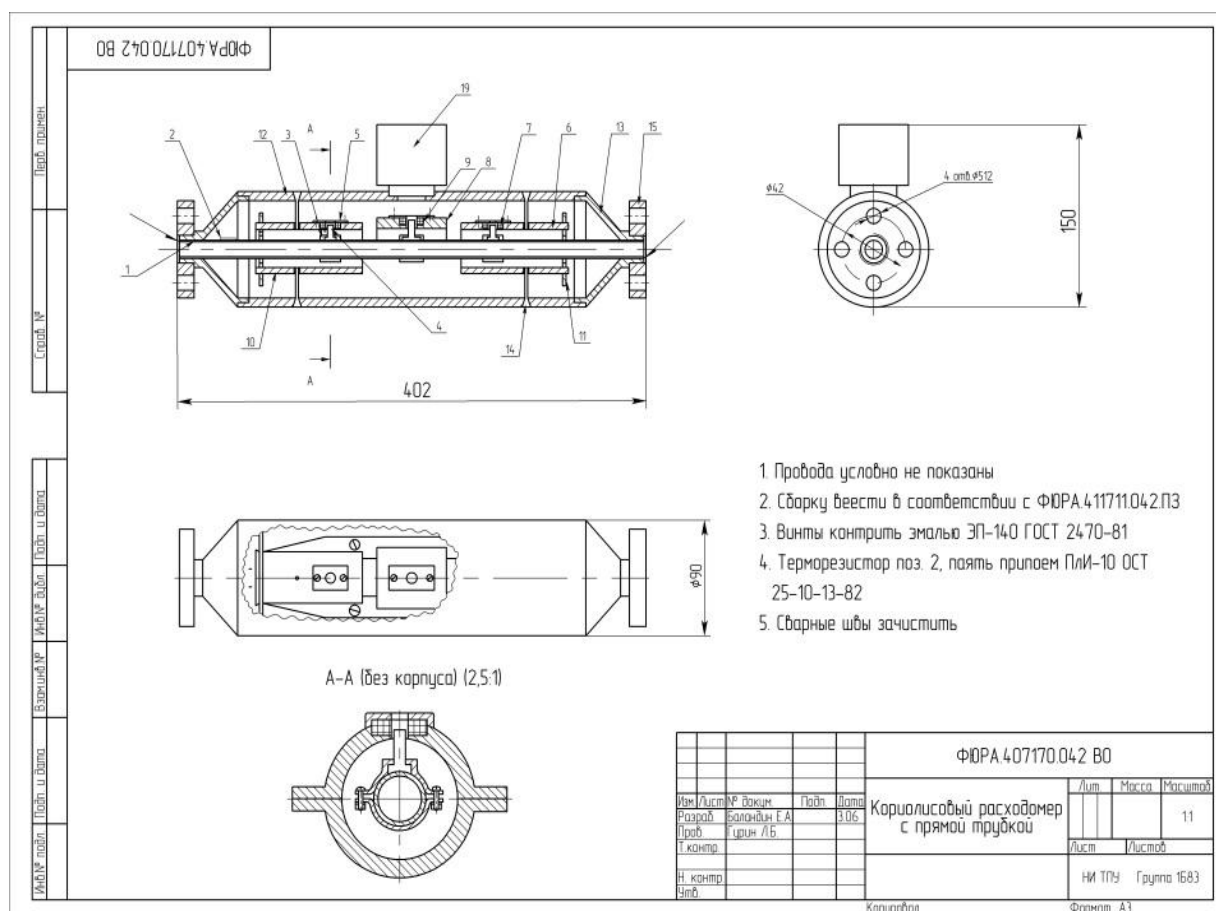


Рис. 4. Сборочный чертеж расходомера с прямой трубкой

К достоинствам кориолисовых расходомеров относится: высокая точность, повторяемость результатов измерений, нет движущихся деталей, не требуются прямые участки. Единственным недостатком такого расходомера является его дороговизна, откуда следует вывод, что такие расходомеры имеет смысл использовать в крупном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа энергосбережения, счетчики воды, теплосчетчики, расходомер // Энергосбережение. 2005. URL: http://www.meshta.ru/voda_idea13.html (дата обращения: 24.09.2012).
2. Алиев И.И., Калганова С.Г. Электротехнические материалы и изделия. Справочник. – М.: ИП Радиософт, 2005. – 352 с.
3. СА 03-003-07 Стандарт ассоциации. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. Взамен СТП 09-04-02 (001-СТП/А, РТМ 38.001-94). Введ. 2006-10-11.
4. Светлицкий В.А. Механика стержней: в 2-х ч. Ч. 2. Динамика. – М.: Высш. шк, 1987. – 304 с.
5. Гурин Л.Б., Нестеренко Т.Г., Плотников И.А. Основы конструирования механизмов сборных систем. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 337 с.

Поступила 24.05.2013 г.