

О парадоксах электромагнитных расходомеров

А.Ю. Ощепков

к. ф.-м. н., директор-главный конструктор¹
Aos57@mail.ru

К.С. Турунцев

аспирант²
const89@yandex.ua

¹Особое конструкторское бюро «Маяк»,
Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь, Россия

Электромагнитные расходомеры с поперечным магнитным полем и электродами, контактирующими со средой (ЭМР), просты по конструкции, надежны и относительно не дороги, они широко применяются в современном производстве, в том числе в нефтяной промышленности. Аналитическое решение уравнений магнитной гидродинамики и компьютерное моделирование позволяют глубже понять физические принципы действия ЭМР и оценить роль факторов, влияющих на точность измерений.

Материалы и методы

Исследования проведены с помощью аналитических решений уравнений магнитной гидродинамики и компьютерного моделирования.

Ключевые слова

магнитная гидродинамика, электрическая проводимость, электромагнитный расходомер, кондуктивный расходомер, точность измерений

Индукционный или кондукционный?

В современной промышленности применяются электромагнитные расходомеры различных типов: с проводящими и непроводящими стенками мерного участка трубы, с радиальным магнитным полем, формируемым продольным электродом, и с поперечным магнитным полем с радиально расположенными электродами, контактирующими и не контактирующими с измеряемой средой. Рассмотрим только один тип расходомера, проточная часть которого представляет собой трубу круглого сечения с внутренними стенками из электроизоляционного материала, в диаметрально противоположных точках трубы расположены два электрода, контактирующие со средой, снаружи трубы расположены катушки индуктора, формирующие магнитное поле в направлении, перпендикулярном оси расположения электродов и оси трубы. Такие расходомеры не имеют внутри выступающих частей (полнопроходные) и не дороги в производстве. В стоимость входит цена изготовления проточной части с магнитной системой и электронного блока, формирующего магнитное поле и осуществляющего измерение.

Если жидкость обладает небольшой электрической проводимостью, то при ее движении в магнитном поле вследствие магнитогидродинамических эффектов возникает электрическое поле (явление электромагнитной индукции). Потенциал этого поля имеет сложное распределение по сечению трубы, разность потенциалов между точками расположения электродов и является полезным сигналом, измеряемым ЭМР. Значение потенциала электрического поля Φ в точке с координатами

$$\vec{r} = \{x, y, z\}$$

при постоянной электропроводности среды σ определяется из решения дифференциального уравнения в частных производных:

$$\Delta\Phi = \operatorname{div}(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

где \vec{V} и \vec{B} — скорость потока и индукция магнитного поля в точке. Уравнение (1) приведено в монографии [1], учебном пособии [2], обзоре [3] и во множестве других публикаций.

Первый парадокс: почему уравнение, теоретически описывающее работу устройства, основанную на наличии электропроводности измеряемой среды, не содержит этой величины? Сигнал совсем не зависит от σ ? Почему же производители ЭМР указывают нижнюю σ_{\min} и верхнюю σ_{\max} границу электропроводности, при которых прибор сохраняет работоспособность? Во всех вышеприведенных источниках нет ответа на поставленные вопросы. Попробуем разобраться и оценить границы применимости ЭМР рассматриваемого типа по значению электрической проводимости. Параметр определяется природой и не зависит от человеческого фактора.

Далее. В уравнение (1) входят локальные значения скорости и магнитной индукции в каждой точке поперечного сечения трубы в плоскости электродов. Распределение поля скоростей на месте установки расходомера

может оказаться каким угодно. Характер течения при изменении расхода жидкости может измениться с ламинарного на турбулентный, с переходом через область перемежающейся турбулентности [4]. А электромагнитный расходомер работает! Причем диапазон ЭМР значительно превышает диапазоны ультразвуковых, тахометрических и других расходомеров. Парадокс. Как расходомеру удастся сохранить стабильность в широком диапазоне расходов? Попробуем разобраться и рассмотреть требования к виду поля скоростей, которые обеспечивают необходимую точность измерений.

И, наконец, рассмотрим влияние неоднородности поля, создаваемого магнитной системой, на выходной сигнал расходомера. Этот фактор определяется конструктивными особенностями прибора, технологией изготовления и точностью сборки магнитной системы.

Прежде чем приступить к анализу поставленных вопросов, отметим терминологический курьез, связанный с электромагнитными расходомерами рассматриваемого типа. При переводе монографии Дж. Шерклифа [1] с английского на русский язык в 1965 году редактор перевода сделал сноску: «Употребляемый автором термин *induction flowmeter* переводится как «кондукционный расходомер» в соответствии с терминологией, принятой в отечественной литературе». Индукционными, строго говоря, называются расходомеры, использующие принцип бегущего магнитного поля. Кто из современных российских производителей ЭМР кондукционного типа называет их кондукционными? Никто. Все используют «антинаучный» термин «индуктивный» или «индукционный», коль скоро работа расходомера основана на принципе электромагнитной индукции. Парадокс. Рассмотрим же теорию этого парадоксального ин... простите, кондукционного расходомера.

О влиянии электрической проводимости

Стационарные течения несжимаемых проводящих вязких жидкостей в магнитном поле описываются уравнениями стандартной диссипативной магнитной гидродинамики [5]:

$$(\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\nabla\frac{P}{\rho} + \nu\Delta\vec{V} + \frac{1}{c\rho}\vec{J} \times \vec{B}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div}\vec{V} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{rot}\vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{J}, \quad (4)$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0, \quad (5)$$

$$\vec{J} = \sigma(-\nabla\Phi + \frac{1}{c}\vec{V} \times \vec{B}). \quad (6)$$

Здесь использованы стандартные обозначения для физических величин: скорости потока жидкости, индукции магнитного поля, плотности электрического тока, электрического потенциала, давления, плотности и электрической проводимости жидкости. Уравнение (2) является уравнением Навье-Стокса с учетом силы Лоренца и описывает баланс сил в жидкости. Уравнение (3)

задает условие несжимаемости жидкости. Уравнения (4) и (5) – это уравнения Максвелла для магнитного поля, уравнение (6) представляет закон Ома для движущейся среды.

Если взять дивергенцию от обеих частей уравнения (6), то благодаря тому, что дивергенция ротора равна нулю, при постоянном по пространству значении электрической проводимости σ , действительно, сразу получим уравнение (1). Но это уравнение просто заменяет уравнения (4) и (6), его нельзя решать отдельно от уравнений (2), (3) и (5). Очевидно, что с ростом σ возрастает индуцированный ток \vec{j} , что, в соответствии с уравнениями (2) и (4), видоизменяет магнитное поле \vec{B} и распределение поля скоростей \vec{V} . Последний эффект приведет к искажениям показаний расходомера. Здесь и нужно искать ограничения на значение σ .

Для анализа удобно использовать безразмерные величины [6]:

$$\vec{V} = V_0 \vec{v}, \vec{B} = B_0 (\vec{n} + \vec{b}), \vec{R} = D \vec{r}, P = \rho V_0^2 p, \Phi = \frac{V_0}{c} DB_0 \phi, \vec{j} = \frac{4\pi}{B_0 c} \vec{j}. \quad (7)$$

Здесь V_0, B_0 – характерные величины скорости жидкости и индукции магнитного поля; D – диаметр проточной части расходомера. Вектор \vec{n} задает распределение магнитного поля, созданного магнитной системой, вектор \vec{b} – поля, индуцированного движением жидкости.

В безразмерных переменных система (2)–(6) примет вид

$$(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\nabla p + \text{Re}^{-1} \Delta \vec{v} + \text{Al} \cdot \vec{j} \times (\vec{n} + \vec{b}), \quad (8)$$

$$\text{div} \vec{v} = 0, \quad (9)$$

$$\vec{j} = \text{rot} \vec{b}, \quad (10)$$

$$\text{div}(\vec{n} + \vec{b}) = 0, \quad (11)$$

$$\text{rot} \vec{b} = \varepsilon(-\nabla \phi + \vec{v} \times (\vec{n} + \vec{b})), \quad (12)$$

где $\text{Re} = DV_0/\nu$ – число Рейнольдса, $\text{Al} = B_0^2/4\pi\rho V_0^2$ – число Альфвена. Буквой ε обозначено магнитное число Рейнольдса Re_m , зависящее от проводимости жидкости:

$$\varepsilon \equiv \text{Re}_m = \frac{4\pi\sigma DV_0}{c^2} \quad (13)$$

Система (8)–(12) представляет собой полную систему уравнений движения проводящей жидкости в магнитном поле, с помощью которой можно исследовать сигнал в ЭМР. Этот сигнал является разностью потенциалов ϕ между точками (или конечными областями), в которых находятся электроды, контактирующие с жидкостью.

Полученные уравнения справедливы для любых жидкостей. Например, в [6] они используются для исследования движения жидких металлов, когда $\varepsilon > 1$. Для таких жидкостей сила Лоренца в (8) вызывает искажения потока, и данные измерений становятся недостоверными. Рассмотрим решение задачи при малых значениях параметра ε , когда систему (8)–(12) можно решать с помощью теории возмущений [7]. Разложим каждую из величин, входящих в систему, в ряд по ε :

$$A = \sum_{k=0} A^{(k)} \varepsilon^k = A^{(0)} + A^{(1)} \varepsilon + \dots,$$

где в качестве A выступают величины $\vec{b}, \phi, \vec{v}, \vec{j}$.

Подстановка этого ряда в систему (8)–(12) при $\varepsilon = 0$ дает:

$$\text{rot} \vec{b}^{(0)} = 0; \quad (\vec{v}^{(0)}\nabla)\vec{v}^{(0)} = -\nabla p + \text{Re}^{-1} \Delta \vec{v}^{(0)}. \quad (14)$$

Таким образом, при отсутствии электрической проводимости жидкости

индуцированное магнитное поле отсутствует, а распределение поля скоростей определяется решением невозмущенного уравнения Навье-Стокса (14).

В первом порядке по ε из (12) получаем уравнение, определяющее индуцированное магнитное поле:

$$\text{rot} \vec{b}^{(1)} = -\nabla \phi^{(0)} + \vec{v}^{(0)} \times \vec{n}. \quad (15)$$

Взяв дивергенцию от обеих частей (15), с учетом того, что $\text{div}(\text{rot} \vec{b}) \equiv 0$, $\text{div} \nabla \equiv \Delta$, получим уравнение, описывающее распределение потенциала электрического поля в жидкости

$$\Delta \phi^{(0)} = \text{div}(\vec{v}^{(0)} \times \vec{n}). \quad (16)$$

Уравнение (16) внешне похоже на уравнение (1), но отличается от него принципиально: в правой части стоит постоянный вектор внешнего магнитного поля \vec{n} , созданного магнитной системой расходомера, и вектор скорости неискаженного магнитным полем потока жидкости, определяемого уравнением (14).

Таким образом, распределение электрического потенциала, а значит, и сигнал расходомера не зависит от проводимости жидкости в линейном по ε приближении. Однако в выражении для скорости $\vec{v} = \vec{v}^{(0)} + \varepsilon \vec{v}^{(1)}$ добавка $\vec{v}^{(1)}$ не равна нулю, а определяется из решения линейного уравнения

$$(\vec{v}^{(0)}\nabla)\vec{v}^{(1)} + (\vec{v}^{(1)}\nabla)\vec{v}^{(0)} = \text{Re}^{-1} \Delta \vec{v}^{(1)} + \text{Al} \cdot [\vec{j}^{(1)} \times \vec{n}]. \quad (17)$$

Вид функции $\vec{v}^{(1)}$ нас не интересует, важно, что добавка пропорциональна ε . Этот факт позволяет оценить верхнюю границу ε_{max} для работоспособности расходомера.

Очевидно, что изменения поля скоростей, вызванные магнитным полем, не должны превышать погрешности расходомера δ . Законы метрологии позволяют не учитывать влияющий фактор, если его вклад в погрешность составляет не более 1/3 основной погрешности. Ужесточим это требование и запишем его в виде:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{max}} \sim 0,1\delta. \quad (18)$$

Если основная относительная погрешность расходомера составляет 1% ($\delta = 0,01$), то $\varepsilon_{\text{max}} \sim 10^{-3}$. Найдем из этой оценки величину σ_{max} для расходомера, предназначенного для использования измерений расхода при скоростях $V_0 \leq 1000$ см/с, диаметрах трубопровода ($1 \leq D \leq 15$) см, магнитном поле $B_0 \sim 1000$ Гс. Для верхней границы, в соответствии с (13), (18), получаем оценку

$$\sigma_{\text{max}} \sim 40 \text{ См/м}. \quad (19)$$

Производители расходомеров классов точности 0,5...2,0, использующие недорогие электронные и цифровые комплектующие, обычно осторожно указывают $\sigma_{\text{max}} = 10 \text{ См/м}$.

Осталось пояснить, откуда берется нижняя граница σ_{min} , которая также приводится в технических характеристиках расходомеров. Ее значение определяется конструктивными особенностями электронного измерительного блока (входное сопротивление, коэффициент усиления, разрядность АЦП и т.п.) и для рассматриваемых нами расходомеров составляет $\sigma_{\text{min}} \sim 10^{-5}$ См/м. При меньших значениях проводимости или при ее отсутствии (чистые органические жидкости) необходимо

использовать электромагнитные расходомеры емкостного типа, работающие на токах смещения. Их стоимость близка к стоимости кориолисовых массометров.

Уравнение (14) с учетом определений (7) показывает, что в диапазоне электрических проводимостей $\sigma_{\text{min}} \leq \sigma \leq \sigma_{\text{max}}$ (параметр изменяется в миллионы раз!) сигнал ЭМР не зависит от σ , точнее сказать, этой зависимостью можно пренебречь в пределах погрешности измерений. Первый парадокс разрешен.

Сигнал в однородном магнитном поле

Приведем еще одну цитату из книги [1]: «Немногие другие расходомеры дают ошибку более $\pm 100\%$ при наличии источников возмущений вверх по потоку!». Речь идет о том, что при общем направлении расхода «вниз по потоку» локальные движения жидкости вблизи одного из электродов «вверх по потоку», обусловленные особенностями трубопровода, могут привести к тому, что расходомер изменит знак выходного сигнала (погрешность 100%). Чтобы понять, почему это происходит и какие требования предъявляются к форме распределения поля скоростей, обеспечивающие достоверные показания расходомера, найдем аналитически решение уравнения (16) для осесимметричного потока в однородном магнитном поле.

Систему координат выбираем так, как указано на рис. 1. Постоянный вектор магнитной индукции имеет координаты $\vec{n} = (0, 1, 0)$; вектор скоростей $-\vec{v} = (0, 0, v(r))$. Уравнение (16) примет вид

$$\Delta \phi = -\frac{dv}{dr} \cdot \cos \vartheta.$$

Проведя разделение переменных $\phi(r, \vartheta) = \psi(r) \cos \vartheta$, для радиальной части потенциала отсюда получим неоднородное уравнение Эйлера

$$\frac{d^2 \psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} - \frac{1}{r^2} \psi = -\frac{dv}{dr}. \quad (20)$$

Решив уравнение (20) методом вариации постоянных при граничном условии

$$\left. \frac{d\psi}{dr} \right|_{r=1/2} = 0,$$

обусловленном электрической изолированностью стенок трубы и нулевой скоростью потока у стенок, для $\phi(r, \vartheta)$ получим окончательно:

$$\phi(r, \vartheta) = -\left(\frac{1}{r} \int_0^r v(\xi) \xi d\xi + 4r \frac{q}{2\pi} \right) \cdot \cos \vartheta. \quad (21)$$

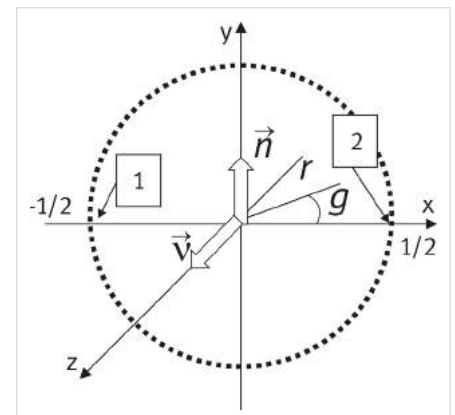


Рис. 1 – Выбор системы координат. Поток направлен по оси Z. Разность потенциалов измеряется между точками 1 и 2

$$\text{Здесь } q \equiv \iint_S v ds = 2\pi \int_0^{1/2} v(r)r dr$$

— мгновенный расход жидкости через сечение расходомера.

Поскольку сигнал $e_{12} = \varphi(1) - \varphi(2) = \varphi(1/2, \pi) - \varphi(1/2, 0)$, то из (9) получим

$$e_{12} = \frac{4}{\pi} q.$$

В размерных единицах (СГС) сигнал примет вид

$$E = \frac{4}{\pi c} \cdot \frac{B_0}{D} Q, \quad Q = \iint_S v ds. \quad (22)$$

Отметим, что величина Q в (22) представляет собой расход жидкости, для измерения которого и предназначен расходомер. Таким образом, сигнал в ЭМР при однородном магнитном поле и осесимметричном течении в трубе круглого сечения пропорционален измеряемой величине независимо от вида радиального распределения вектора скорости потока как при турбулентном, так и при ламинарном потоке. В этом и состоит разрешение второго парадокса.

Отклонение симметрии потока от осевой, особенно движение с разными скоростями у диаметрально противоположных электродов, приводит к искажению сигнала. Следовательно, при монтаже прибора на месте установки необходимо соблюдать требования технической документации и проводить регулярное техническое обслуживание расходомера. Особенно следует избегать возникновения местных гидравлических сопротивлений в зоне измерений или непосредственно перед ней, поскольку они вызывают наибольшие нарушения симметрии потока.

Влияние формы магнитного поля

Для создания однородного магнитного поля в измерительном сечении индуктор должен иметь размеры, превосходящие диаметр трубы (катушка Гельмгольца). Однако обычно катушки индуктивности, формирующие поле, не превосходят по размерам диаметра трубопровода и имеют внутри ферромагнитный сердечник. Такая конструкция приводит

к неоднородности магнитного поля. Введем вектор $\delta \vec{B}$, характеризующий эту неоднородность, по правилу:

$$\delta \vec{B} = \vec{B} - \vec{B}_0, \quad \vec{B}_0 = \frac{1}{S} \iint_S \vec{B}(\vec{r}) dS. \quad (23)$$

Рассмотрим поле, создаваемое двумя плоскими катушками индуктивности, оси которых совпадают с осью Y , находящимися на одинаковом расстоянии от плоскости XZ , с магнитным сердечником внутри. На рис. 2 такая система изображена для расходомера Ду 50. Распределение магнитного поля в плоскости XY было получено с помощью математического моделирования в пакете ANSYS. Результат приведен на рис. 2. Для значения неоднородности получена оценка

$$\frac{\delta B}{B_0} = 0,36. \quad (24)$$

Кроме того, было установлено, что поле обладает определенной симметрией, компонента вектора $\delta \vec{B}$ симметрична относительно плоскостей XZ и YZ , а δB_x — антисимметрична относительно этих плоскостей:

$$\begin{aligned} \delta B_y(-x, -y) &= \delta B_y(x, y), \\ \delta B_x(-x, -y) &= -\delta B_x(x, y). \end{aligned} \quad (25)$$

Можно предположить, что на сигнал влияет не величина неоднородности, указанная в (24), а отклонение поля от симметрии (25). Для качественной проверки этого предположения проведены аналитические вычисления для случая, когда вектор $\vec{m} = \vec{B}/B_0 = \vec{n}_0 + \vec{m}$, где $\vec{n}_0 = \{0, 1, 0\}$, а вектор \vec{m} имеет вид, удовлетворяющий симметрии (25):

$$\vec{m} = \{-m \sin 2\vartheta, -m \cos 2\vartheta, 0\}, \quad m = \frac{\delta B}{B_0}. \quad (26)$$

Уравнение (16) для осесимметричного потока примет вид

$$\Delta \varphi = \left(-v' + \frac{mv}{r}\right) \cos \vartheta + \left((mv)' + \frac{mv}{r}\right) \cos 3\vartheta, \quad (27)$$

который справедлив и для случая $m = m(r)$.

Решение уравнения (27) методом разделения переменных невозможно. Предположим, что распределения $m(r)$ и $v(r)$ таковы,

что коэффициент перед $\cos 3\vartheta$ близок к нулю. В этом случае решение уравнения (27) для значения потенциала на стенках проточной части ($R=1/2$) дает выражение

$$\varphi(R, \vartheta) = -\frac{1}{R} \int_0^R (mv) r dr \cdot \cos \vartheta. \quad (28)$$

Для сигнала получим выражение аналогичное (22):

$$E = \frac{4}{\pi c} \cdot \frac{B_0 + \delta B/2}{D} \cdot Q. \quad (29)$$

Таким образом, в случае обеспечения симметрии распределения магнитного поля в соответствии с (26), сигнал остается пропорционален расходу, причем коэффициент пропорциональности определяется усредненным значением неоднородности поля. Однако не нужно забывать, что аппроксимация (26) является приближенной, поэтому в действительности сигнал зависит от значения измеряемого расхода нелинейно. Величина нелинейности, конечно, не пропорциональна неоднородности поля, оцененной в (24), тем не менее многие производители расходомеров вынуждены с ней считаться и для линеаризации НСХ прибора использовать кусочно-линейную аппроксимацию.

Детально рассмотреть форму сигнала расходомера в поле, создаваемом его магнитной системой, можно только путем численного решения уравнения (16). О результатах численных экспериментов и о возможных методах оптимизации работы ЭМР мы расскажем в следующей статье.

Итоги

Оценены предельные значения электрической проводимости жидкости, при которых расходомеры обеспечивают заданную точность измерений, определены требования к форме потока и к симметрии магнитного поля и приведены условия их выполнения.

Выводы

Приведенные в статье результаты исследований позволят специалистам нефтяной промышленности по-новому взглянуть на работу ЭМР и, возможно, расширить область их применения в своей отрасли.

Список используемой литературы

1. Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода. М.: Мир, 1965. 268 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
3. Коптев В.С., Прохоров А.В., Сычев Г.И. Обзор состояния и перспективы развития электромагнитных расходомеров и теплосчетчиков. Режим доступа: http://www.teplotunkt.ru/articles/dloads/0111_sgi_emr.pdf (дата обращения 26.01.2015)
4. Кавригин С.Б. Диапазон 1000... так все-таки он достижим? Режим доступа: <http://www.vzljot.ru/files/publications/180194.pdf> (дата обращения 26.01.2015).
5. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики. М.: Мир, 1965. 268 с.
6. Хальзов И.В., Смоляков А.И. К расчету стационарных магнитогидродинамических течений жидких металлов в кольцевых каналах прямоугольного сечения // Журнал технической физики. 2006. Т.76. С.28–35.
7. Найфэ А. Введение в методы возмущений. М.: Мир, 1984. 535 с.

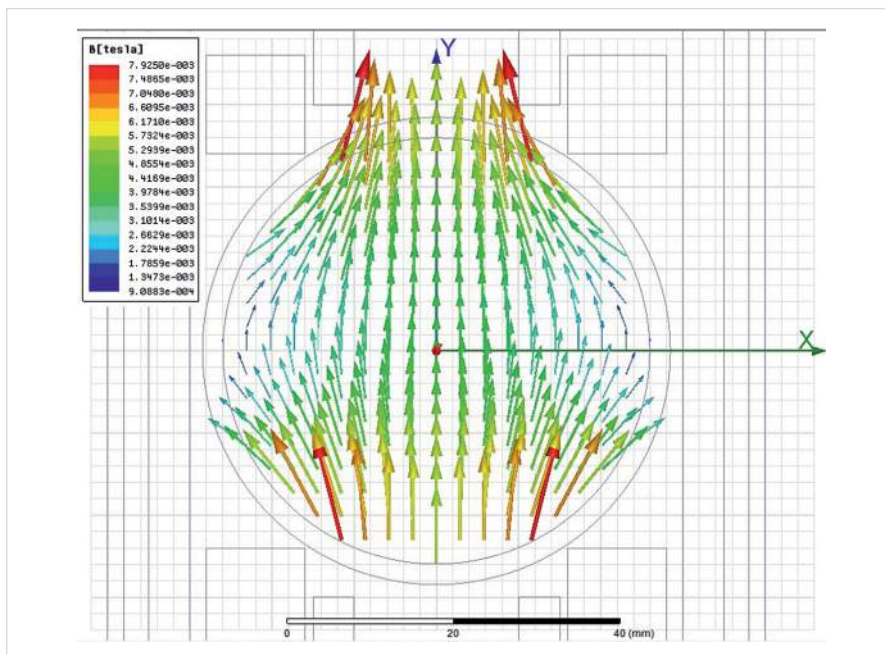


Рис. 2 — Распределение магнитного поля в плоскости поперечного сечения расходомера

About paradoxes of electromagnetic flowmeters

Authors:

Alexandr Yu. Oshchepkov — Ph.D., director-chief designer¹; Aos57@mail.ru
Konstantin S. Turutsev — postgraduate²; const89@yandex.ua

¹Special design bureau "Mayak", Perm, Russian Federation

²Perm State University, Perm, Russian Federation

Abstract

Electromagnetic flowmeters with a transverse magnetic field and into contact with the medium (EMF) are simple in design, reliable, and relatively no expensive, they are widely used in modern industry, including the oil industry. Analytical solution of the magnetohydrodynamic equations and computer simulation allow a deeper understanding of the physical principles of working EMF and to assess the role of factors influencing the accuracy of measurements.

Materials and methods

Studies were carried out using analytical solutions of MHD-equations and computer simulation.

Results

The maximum values of the electric conductivity of the liquid in which ensure a predetermined flow measurement accuracy are estimated, the requirements to the form stream and to symmetry of the magnetic field are determined and the conditions for their execution are given.

Conclusions

The results presented here allow experts to the oil industry to take a fresh look at the work of EMF and possibly expand the scope of their application in their industry.

Keywords

magnetic hydrodynamics, electrical conductivity, electromagnetic flowmeter, induction flowmeter, accuracy of measurements

References

1. Shercliff J. *Teoriya elektromagnitnogo izmereniya raskhoda* [Theory of electromagnetic flow-measurement]. Moscow: Mir, 1965, 268 p.
2. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. Moscow: Nauka, 1982, 620 p.
3. Koptev V.S., Prokhorov A.V., Sychev G.I. *Obzor sostoyaniya i perspektivy razvitiya elektromagnitnykh raskhodomerov i teploschetchikov* [Review of the status and prospects of development of electromagnetic flowmeters and heat meters]. Available at: http://www.teplotpunkt.ru/articles/dloads/0111_sgi_emr.pdf (accessed 26 January 2015).
4. Kavrigin S.B. *Diapazon 1000... tak vse-taki on dostizhim?* [The range of 1000 ... so still it is achievable?]. Available at: <http://www.vzljot.ru/files/publications/180194.pdf> (accessed 26 January 2015).
5. Shercliff J. *Kurs magnitnoy gidrodinamiki* [The course magnetohydrodynamics]. Moscow: Mir, 1965, 268 p.
6. Halzov I.V., Smolyakov A.I. *K raschetu statsionarnykh magnitogidrodinamicheskikh techeniy zhidkikh metallov v kol'tsevykh kanalakh pryamougol'nogo secheniya* [On the calculation of stationary magnetohydrodynamic flows of liquid metals in the ring rectangular channels]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2006, Vol.76, pp. 28–35.
7. Nayfe A. *Vvedenie v metody vozmushcheniy* [Introduction to perturbation methods]. Moscow: Mir, 1984, 535 p.

ФГУП «ОКБ «Маяк»

Комплекс измерительный ИМ2300ГК для учета природного и нефтяного попутного газа

Основа комплекса — теплоэнергоконтроллер ИМ2300 (ИМ2300Ех) в исполнении «Вычислитель объема газа в стандартных условиях»

Контроллер модификации Ех соответствует Техническому регламенту Таможенного союза ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах».

Относительная погрешность при определении объема газа, приведенного к стандартным условиям, определяется расчетным путем на основании паспортных данных составных частей комплекса.

Пределы допускаемой относительной погрешности комплекса при вычислении объема газа, приведенного к стандартным условиям, соответствуют требованиям ГОСТ Р 8.740-2011 для уровней точности В, Г, Д.



г. Пермь, ул. Данщина, 19
www.okbmayak.perm.ru
officemayak@mail.ru

+7 (342) 237-17-70, -80, -90