

Моделирование и анализ возможностей использования цилиндрической струи жидкости в качестве антенного элемента

А. А. Очиров,^{*} Т. К. Артёмова,[†] С. В. Ходырев
Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова,
физический факультет, кафедра инфокоммуникаций и радиофизики
Россия, 150003, Ярославль, ул. Советская, д. 14/2
(Статья поступила 30.07.2019; Подписана в печать 31.07.2019)

Была рассмотрена математическая модель антенного элемента, выполненного из цилиндрической струи жидкости. Рассмотрено влияние капиллярного распада струи на форму поверхности и, как следствие, на характеристики усиления и направленности антенны. Получены асимптотические аналитические выражения для формы поверхности без учета влияния электромагнитного поля. Синтезирована антенна с жидкой струей. Полученные характеристики демонстрируют работоспособность антенны.

PACS: 47.35.Pq, 84.40.Ba

УДК: 532.594+537.867.

Ключевые слова: антенна, цилиндрическая струя жидкости, капиллярный распад струи, характеристики, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно исследуются перспективные системы связи и возникает необходимость в освоении новых частотных диапазонов для средств связи как гражданского, так и специального назначения. Это явилось причиной активизации исследований в области антенной техники с целью создания антенных элементов с изменяемой геометрией и, как следствие, управляемыми характеристиками направленности, усиления и частотными характеристиками. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы может служить использование жидкого диэлектрика в качестве основного материала исполнения антенного элемента. На сегодняшний день ведется активное исследование в этой области (см. например [1–6]) и даже получен ряд патентов [7, 8]. Эти исследования показывают принципиальную возможность использования жидкого цилиндрического столба в качестве основы для антенного элемента. Также в современных исследованиях демонстрируется схожесть характеристик антенного элемента, выполненного из цилиндрического столба диэлектрической жидкости, помещенного в оболочку для поддержания ее формы, с характеристиками короткой проволочной антенны.

Однако во всех этих исследованиях поверхность жидкости не свободна, а ограничена диэлектрической оболочкой, что, с одной стороны, позволяет легко фиксировать форму антенны. Обратной стороной этой конструктивной особенности является то, что во всех исследованиях пренебрегается электрогидродинамическими эффектами, связанными с наличием свободной поверхности у цилиндрической струи. Лорд Рэлей еще в 1879 году теоретически показал, что цилиндриче-

ская струя жидкости неустойчива по отношению к распространению капиллярных волн по ее свободной поверхности [9]. Изначально малая амплитуда колебаний неустойчивых волновых мод экспоненциально нарастает со временем, что приводит к распаду цилиндрической струи на капли. Для свободно стекающей из отверстия круглого сечения жидкости это означает ограниченность сплошной части струи. В контексте применения такой струи в качестве антенного элемента такое изменение формы поверхности будет уменьшать эффективную длину антенны, а следовательно, изменять частотный диапазон и резонансную частоту антенны. Также наличие свободной поверхности сказывается на поляризационных и направленных свойствах антенного элемента.

В настоящем исследовании ставится цель исследовать возможности антенны с использованием жидких элементов. Для этого необходимо построить аналитическую асимптотическую гидродинамическую модель распада жидкой цилиндрической струи на капли под действием капиллярных сил и определить форму свободной поверхности цилиндрической струи жидкости. Затем, основываясь на этих вычислениях, провести математическое моделирование антенного элемента в среде численного электродинамического моделирования с целью анализа частотных и направленных свойств полученной антенны.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТРУИ В СОСТАВЕ «ЖИДКОЙ АНТЕННЫ»

Рассмотрим идеальную несжимаемую жидкость, свободно вытекающую вертикально вниз с постоянной скоростью U_0 из отверстия круглого сечения. Радиус отверстия будем полагать достаточно маленьким для того, чтобы пренебрегать действием сил тяжести. В этом случае можно считать, что равновесная фор-

*E-mail: otchirov@mail.ru

†E-mail: artemova@uniyar.ac.ru

ма поверхности струи жидкости представляет из себя цилиндр радиуса R . Капиллярные силы характеризуются коэффициентом поверхностного натяжения γ . Плотность жидкости обозначим ρ . На поверхности жидкости неминуемо образуются инфинитезимальные капиллярные волновые возмущения малой амплитуды $\zeta \ll R$, связанные с неидеальностью шлифовки отверстия. Для упрощения расчетов задачу удобнее рассматривать в системе отсчета, движущейся в направлении потока жидкости с той же скоростью U_0 . Тогда в цилиндрических координатах (r, φ, z) , в которых ось Oz совпадает с направлением U_0 , полная математическая формулировка задачи по определению гидродинамического потенциала ψ и отклонения формы свободной поверхности от цилиндрической $\xi(\varphi, z, t)$ выглядит следующим образом [10]:

$$0 < r < R + \xi : \quad \Delta\psi = 0; \quad (1)$$

$$r = R + \xi : \quad \frac{dF}{dt} = 0; \quad p - p_{atm} - \text{div } \mathbf{n} = 0; \quad (2)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{e}_r - \frac{1}{r}\partial_\varphi\xi\mathbf{e}_\varphi - \partial_z\xi\mathbf{e}_z}{\sqrt{1 + \frac{1}{r^2}(\partial_\varphi\xi)^2 + (\partial_z\xi)^2}}.$$

Здесь p — гидродинамическое давление в жидкости, p_{atm} — постоянная составляющая, имеющая смысл атмосферного давления, \mathbf{n} — орт нормали к свободной поверхности жидкости, $\mathbf{e}_{r,\varphi,z}$ — орты соответствующих координатных осей, а функция $F(r, \varphi, z, t) = r - (R + \xi(\varphi, z, t))$ описывает отклонение свободной поверхности от равновесного положения $r = R$. Также задача (1) — (2) должна быть дополнена естественны-

ми граничными условиями ограниченности скорости на оси цилиндра $r = 0$.

Задача решалась методом разложения по малому параметру $\varepsilon = \zeta k$, пропорциональному амплитуде волнового движения и волновому числу k , определяющему волновую моду капиллярной волны, распространяющейся вдоль свободной поверхности жидкости. Искомые величины при этом представляются в виде ряда:

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \psi \end{pmatrix} = \varepsilon \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \psi_1 \end{pmatrix} + \varepsilon^2 \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \psi_2 \end{pmatrix} + O(\varepsilon^3). \quad (3)$$

Здесь O — символ Ландау, характеризующий порядок малости остаточных членов разложения (3). Подстановка (3) в (1) — (2) позволяет разбить исходную задачу на порядки малости, при этом граничные условия (2) сносились на равновесный уровень $r = R$ по известной методике, возможность применения которой описана в [11, 12], а подробное ее описание можно найти в [13].

Математическая формулировка задачи первого порядка малости по амплитуде волнового возмущения представляется в виде:

$$0 < r < R : \quad \Delta\psi_1 = 0; \quad (4)$$

$$r = R : \quad -\partial_t\xi_1 + \partial_r\psi_1 = 0; \\ -\rho\partial_t\psi_1 + \frac{\gamma}{r^2}\xi_1 + \frac{\gamma}{r}\partial_{\varphi,\varphi}\xi_1 + \gamma\partial_{z,z}\xi_1 = 0. \quad (5)$$

Математическая задача второго порядка малости определяется выражениями:

$$0 < r < R : \quad \Delta\psi_2 = 0; \quad (6)$$

$$r = R : \quad -\partial_t\xi_2 + \partial_r\psi_2 = -\xi_1\partial_{r,r}\psi_1 + \partial_r\psi_1\partial_r\xi_1 + \frac{1}{r^2}\partial_\varphi\psi_1\partial_\varphi\xi_1 + \partial_z\psi_1\partial_z\xi_1; \\ -\rho\partial_t\psi_2 + \frac{\gamma}{r^2}\xi_2 + \frac{\gamma}{r}\partial_{\varphi,\varphi}\xi_2 + \gamma\partial_{z,z}\xi_2 = \rho\xi_1\partial_{t,r}\psi_1 + \frac{\rho}{2}(\partial_r\psi_1)^2 + \\ + \frac{\rho}{2r^2}(\partial_\varphi\psi_1)^2 + \frac{\rho}{2}(\partial_z\psi_1)^2 + \frac{\gamma}{2r}(\partial_z\xi_1)^2 - \frac{\gamma}{2r^3}(\partial_\varphi\xi_1)^2 - \frac{\gamma}{r^2}\xi_1\partial_{\varphi,\varphi}\xi_1 + \gamma\xi_1\partial_{z,z,r}\xi_1.$$

2. ПОСТРОЕНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Решение задачи первого порядка малости находится стандартными методами математической физики и для волновой моды с волновым числом k и азимутальным числом m запишется в виде:

$$\psi_1 = -\frac{1}{2}\zeta \frac{\omega J_m(-ikr)}{k J'_m(-ikR)} \times \\ \times \exp(im\varphi) \exp(ikz) \exp(i\omega t) + C.C.; \quad (8)$$

$$\xi_1 = \frac{1}{2}\zeta \exp(im\varphi) \exp(ikz) \exp(i\omega t) + C.C.. \quad (9)$$

Здесь символом $C.C.$ обозначены комплексно сопряженные слагаемые, J_m — функция Бесселя первого рода порядка m , а ω — круговая частота волнового движения, которая связана с волновым числом и другими параметрами задачи через дисперсионное уравне-

ние:

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma (R (k^2 R + m^2) - 1) (k R I_{m-1}(k R) - m I_m(k R))}{\rho R^3 I_m(k R)}}. \quad (10)$$

Здесь I_m — модифицированная функция Бесселя первого рода порядка m .

Анализ дисперсионного уравнения показывает, что цилиндрическая струя оказывается устойчивой по отношению к волновым возмущениям малой амплитуды волновых мод с азимутальным числом $m \geq 1$ ($Im(\omega_{m \geq 1}) = 0$). При этом струя оказывается неустойчивой по отношению к волновым возмущениям с азимутальным числом $m_0 = 0$: изначально сколь угодно малая амплитуда таких колебаний экспоненциально нарастает со временем пропорционально множителю $\propto \exp(Im(\omega_{m=0})t)$, и в итоге, когда она превысит радиус цилиндра, струя распадётся на капли. Но это справедливо не для всех длин волн. Неустойчивыми оказываются волновые моды, волновое число ко-

торых в безразмерных переменных $\rho = \gamma = R = 1$ (стандартных для такого типа задач) принимает значения $k \leq k_* = 1$, а наибольший инкремент нарастания демонстрирует волна с волновым числом $k_{max} = 0.7$. Следовательно, наиболее существенный вклад в распад на капли струи, вытекающей из гладко отшлифованного круглого отверстия, будет давать волновое возмущение с азимутальным числом $m = 0$ и волновым числом $k = k_{max} = 0.7$. Именно эту моду мы и будем рассматривать в дальнейшем как формирующую поверхность жидкой струи для создания электродинамической модели антенного элемента.

Задача второго порядка малости представляет из себя задачу с неоднородными граничными условиями. Поэтому необходимо найти частное решение, удовлетворяющее неоднородностям в правых частях граничных условий (7). Подставляя решение (8) — (9) в (7) запишем граничные условия задачи второго порядка малости в явном виде:

$$\begin{aligned} -\partial_t \xi_2 + \partial_r \psi_2 = & -\frac{1}{2} \zeta^2 \omega \exp(2i(kz + m\varphi + t\omega)) \times \\ & \times \frac{-2(3k^2 R^2 + 2m^2) J_m(-ikR) + k^2 R^2 J_{m-2}(-ikR) + k^2 R^2 J_{m+2}(-ikR)}{2kR^2 (J_{m-1}(-ikR) - J_{m+1}(-ikR))} + C.C.; \\ -\rho \partial_t \psi_2 + \frac{\gamma}{r^2} \xi_2 + \frac{\gamma}{r} \partial_{\varphi, \varphi} \xi_2 + \gamma \partial_{z, z} \xi_2 = & \\ \frac{1}{2} \frac{\zeta^2 \omega \exp(2i(kz + m\varphi + t\omega))}{2R^3 (J_{m-1}(-ikR) - J_{m+1}(-ikR))^2} \times & \\ \times [-4\rho R^3 \omega^2 J_m(-ikR)^2 + & \\ + (J_{m-1}(-ikR) - J_{m+1}(-ikR))^2 (m^2 (\gamma + 2\gamma R^2) - R^2 (\gamma k^2 + 3\rho R \omega^2))] + C.C. & \end{aligned} \quad (11)$$

Решение задачи второго порядка малости по амплитуде волны выпишем только для отклонения свободной поверхности от равновесного уровня ξ_2 для неустойчивых волновых мод с азимутальным числом $m = 0$:

$$\begin{aligned} \xi_2 = \frac{1}{2} \mathcal{Z} \exp(2ikz) \exp(2im\varphi) \exp(2it\omega) + C.C.; & \quad (12) \\ \mathcal{Z} = -\frac{\zeta^2 R (k I_1(kR))^2 (\gamma k^2 + 3\rho R \omega^2) - 9k\rho R \omega^2 I_0(kR)^2 + 4\rho \omega^2 I_0(kR) I_1(kR)}{2I_1(kR) (\gamma k (1 - 4k^2 R^2) I_1(kR) + 4\rho R^2 \omega^2 I_0(kR))} & \end{aligned}$$

Выражение (12) уточняет форму поверхности цилиндрической струи жидкости. При необходимости можно построить более точное решение с учетом слагаемых более высоких порядков малости.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа возможности использования цилиндрической струи жидкости (воды) в качестве антенного элемента была определена форма ее свободной поверхности в нулевом, первом и втором приближениях по степеням малого параметра $\varepsilon = \zeta k$. Для исключения влияния гравитации на форму поверхности анализировались тонкие струи, вытекающие вертикально вниз из круглого отверстия цилиндрической насадки водяного

насоса с большой скоростью. Начальный радиус струи при этом определялся радиусом отверстия R , а длина ее сплошной части L — скоростью вытекания жидкости из отверстия U_0 . Все дальнейшие результаты приведены для радиуса 2 мм и скорости воды 5.1 м/с.

В нулевом приближении струя имеет вид кругового цилиндра радиуса R . Поверхность струи в первом и втором приближениях определялась в соответствии с (3), (9) и (12). При этом характер процесса развития неустойчивости поверхности определяется рядом факторов: радиусом отверстия и физически-

ми свойствами жидкости, такими, например, как плотность, электропроводность, коэффициент поверхностного натяжения. Так, для моды с максимальным инкрементом ω_r амплитуды колебаний, проявляющейся при $kR = k_{max}R = 0.7$, соответствующее волновое число для струи радиусом 2 мм равно 348.5 м^{-1} , а сам инкремент отличается для воды с различными свойствами. Для морской воды, солёность которой составляет 35 г/кг, инкремент равен 32.49 с^{-1} , а для дистиллированной — 32.79 с^{-1} . С течением времени амплитуда неустойчивых мод нарастает, и в некоторый момент времени t_1 образующие поверхности смыкаются, струя полностью пережимается и далее распадается на капли. Длина нераспавшейся части струи определялась как $L = U_0 t_1$. Амплитуда колебаний поверхности в начальный момент времени в первом приближении была принята равной малой величине $0.01R$, что составило 20 мкм, а во втором порядке это значение изменялось в зависимости от свойств воды, для морской воды — на 0.051 мкм, что составляет около четверти процента.

Питание подводилось между токонесущим коротким металлическим штырем, размещённым вдоль оси струи, и металлическим диском-рефлектором, расположенным в основании и содержащем отверстие, через которое вытекала струя. Таким образом, струя являлась составной частью антенны.

Анализ проводился в диапазоне частот от 0.1 до 2.2 ГГц, что обусловлено интересом к возможному применению на частотах около 446 МГц (нелицензируемый, свободно используемый маломощными устройствами диапазон частот) и около 2.1 ГГц (Wi-Fi).

В среде электродинамического моделирования были построены модели антенн: чисто металлической (без жидкого элемента), со струями, рассчитанными по (9) и (12), а также с цилиндрической струей из морской и из дистиллированной воды. Характеристики антенн с формами, полученными в разных приближениях, приведены на рисунке 1 для случая солёной воды, длины штыря 20 см и радиуса рефлектора 2.5 см.

Форма и ширина диаграммы направленности для моделей 1-го и 2-го порядков малости не отличаются; коэффициент отражения S_{11} и к.п.д. отличаются на сотые доли дБ, что не превышает 1% относительного расхождения, а входные сопротивления отличаются не более, чем на сотые доли Ом. Таким образом, для практических нужд является достаточным использование для формы жидкого элемента приближения первого порядка малости.

Было проведено сравнение возможностей металлической антенны и разработанной на ее основе жидкой антенны. Как показывает рис. 2, а, к.п.д. обеих антенн — осциллирующая функция, причём максимумы к.п.д. антенны с водой оказываются сдвинуты вправо, следовательно, антенна с водой является более высокочастотной. Это является ожидаемым эффектом, т.к. электромагнитное поле, определяющее ее свойства, существует не только в воздухе, но и частично в диэлектрике с некоторой проводимостью, окружающем

металлический штырь. Однако, т.к. слой диэлектрика тонкий, нельзя утверждать, что эффект совпадает с эффектом помещения излучателя в бесконечную или полубесконечную диэлектрическую среду — относительный сдвиг рабочей частоты, демонстрируемый первым пиком эффективности, составляет около 28 %, вторым — около 19 %. Эти величины отличаются от ожидаемого в случае бесконечной среды результата, равного $\sqrt{\epsilon} - 1$ (что составило бы для морской воды около 760 %), т.е. изменения в разы вовсе не наблюдаются. В то же время общий вид (форма) частотной зависимости эффективности для антенны с водой и чисто металлической практически совпадают. Можно предположить, что такая тонкая струя влияет не столько за счет изменения геометрических параметров антенны, сколько за счет появления областей, в которых по сравнению с воздухом имеются потери, т.е. за счёт свойств воды как вещества.

Входное сопротивление антенны при включении в ее состав жидкой струи претерпевает существенные изменения, как по форме частотной зависимости, так и по величине активного и реактивного сопротивлений. Сопротивление металлической штыревой антенны носит резонансный характер, так что вид частотной зависимости S_{11} — практически периодический, с ярко выраженными резонансами, т.е. вдали от областей резонанса сопротивление велико (может достигать сотен Ом). У антенны со струей воды эти эффекты сглажены — резонансы слабее, шире, а абсолютные значения сопротивления — на порядок меньше. Это приводит к тому, что «жидкую» антенну легче согласовать в более широкой полосе частот, т.е. использование диэлектрика (воды) позволяет сделать антенну более широкополосной. Платой за этот выигрыш является снижение эффективности, причём даже в ситуации, когда антенна будет согласована по входу со стандартным сопротивлением фидера, нужно принимать меры для улучшения эффективности. В частности, поэтому в качестве одного из элементов разработанной конструкции использовался рефлектор — испытанное средство повышения эффективности широкополосных и/или коротких антенн.

В интересующем диапазоне частот полное поле внутри и около струи формируется в основном касательными к рефлектору компонентами вектора напряженности электрического поля (что соответствует структуре поля в области подвода питания). Наличие жидкого диэлектрика изменяет распределение токов.

Диаграмма направленности антенн (ДН) определяется, главным образом, их геометрией; в том числе, начиная с некоторой частоты, вносит свой вклад рефлектор. На самых низких частотах анализируемые антенны являются ненаправленными (с низкой излучательной эффективностью). Начиная с частоты 350 МГц, излучательная эффективность повышается, что оправдывает применение антенны к различным практическим задачам, требующим работы в данном диапазоне. Диаграмма направленности имеет вид тора. При дальней-

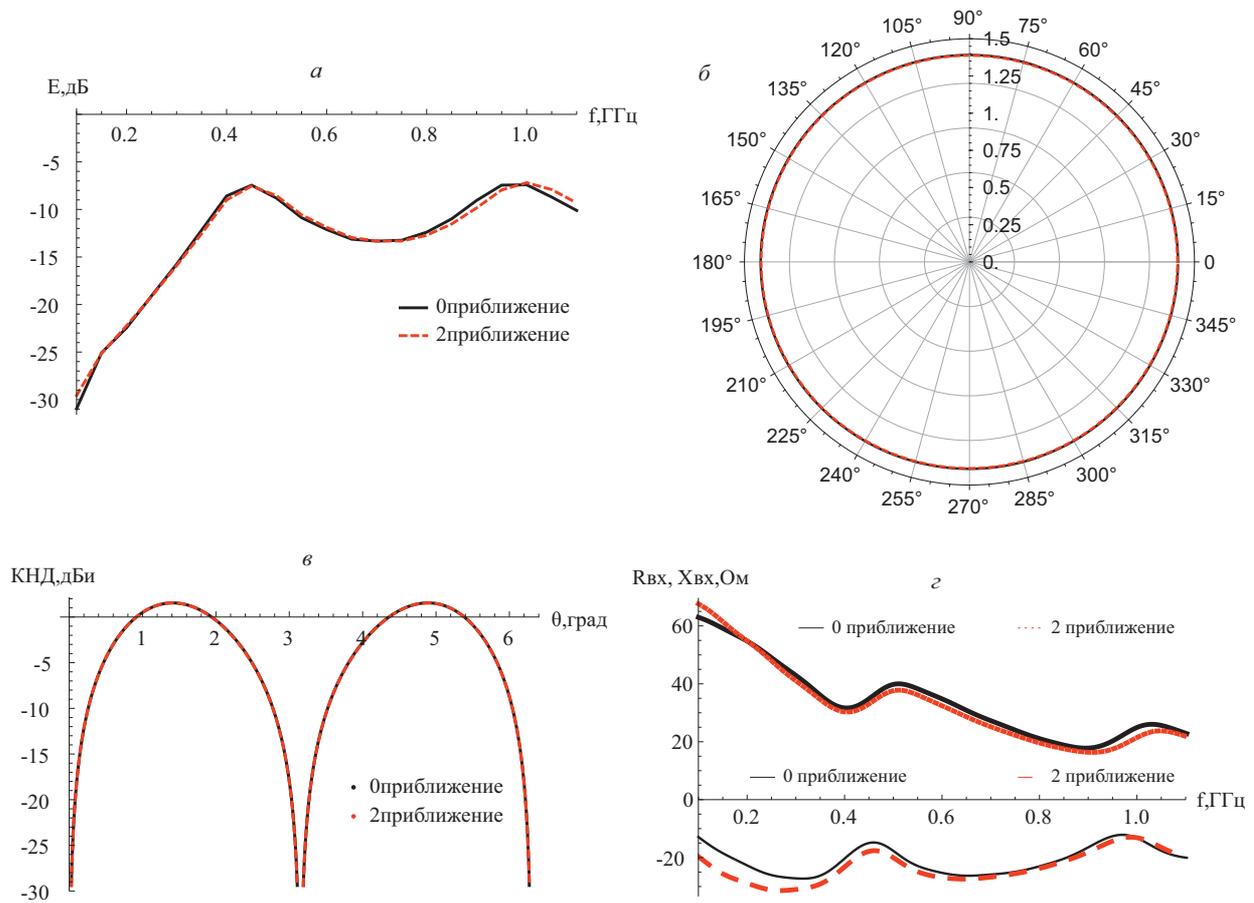


Рис. 1: Сравнительный анализ характеристик антенны, полученных при различных приближениях формы свободной поверхности жидкого элемента: *а* — к.п.д. антенны; *б* — сечение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости на частоте 446 МГц; *в* — сечение диаграммы направленности в вертикальной плоскости на той же частоте; *г* — активные R и реактивное X входные сопротивления

шем повышении частоты поперечное излучение (максимум которого лежит в плоскости рефлектора) сменяется коническим излучением — направления максимального излучения составляют некоторый угол с осью антенны, а поверхность равных значений ДН приближается к конусу с вершиной, обращённой к центру антенны. Такая ДН является вполне адекватной для использования в задачах обеспечения связи внутри помещений, когда не требуется большой зоны покрытия. Чем выше используемый диапазон частот, тем выше стоит размещать антенну с жидкой струёй для обеспечения примерно одинакового качества связи на всей территории.

Диаграмма направленности антенны с водяной струёй несколько повернута относительно ДН металлической антенны. Эффект демонстрирует рисунок 2, в, представляющий увеличенную часть ДН для частоты 0.45 ГГц. У антенны с водой максимум излучения на 6 градусов сдвинут в сторону оси антенны. На более высоких частотах, включая один из диапазонов Wi-Fi, влияние жидкого диэлектрика оказывается заметнее (рис. 2,б). Наблюдаются и поворот главного лепест-

ка, и поворот боковых лепестков, и изменение уровней лепестков и провалов ДН.

Выше было указано, что степень солёности воды оказывает влияние на форму жидкого антенного элемента. Кроме этого, физические свойства материалов влияют на характеристики антенны.

В первую очередь зависит от солёности воды к.п.д. антенны E , включающий в себя потери энергии в веществе жидкого элемента: к.п.д. антенны с пресной водой на 446 МГц составляет -0.496 дБ, что близко к идеальному значению, а солёная вода обеспечивает лишь -7.55 дБ (рис. 3,а)

Существенное влияние оказывает солёность и на входное сопротивление антенны (рис. 3,в и г) и связанный с ним коэффициент отражения от входа S_{11} (рис. 3,б), причем антенна с солёной водой оказывается лучше согласованной по входу со стандартным сопротивлением фидера 50 Ом.

Диаграммы направленности антенн для жидкого элемента из солёной и пресной воды визуально очень схожие, однако солёность воды оказывает влияние на ширину диаграммы направленности в вертикальной

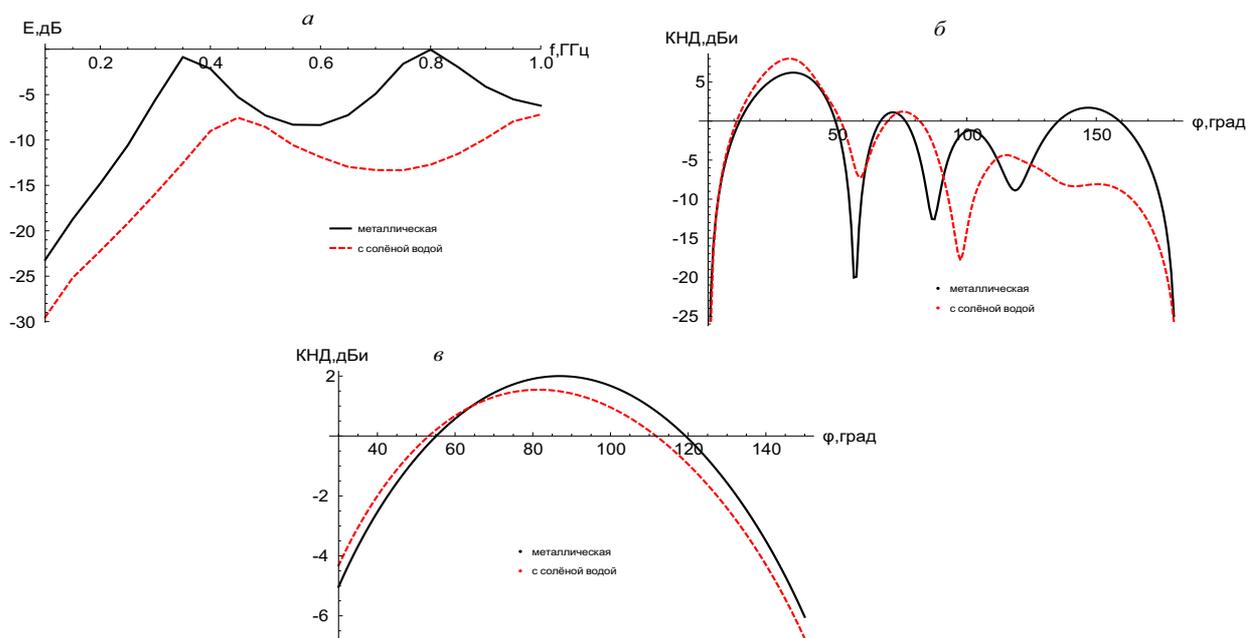


Рис. 2: Сравнительный анализ характеристик антенн из разных материалов — чисто металлической и антенны с солёной водой: *а* — к.п.д. антенны; *б* — сечение диаграммы направленности в горизонтальной плоскости на частоте 446 МГц; *в* — сечение диаграммы направленности в вертикальной плоскости на той же частоте

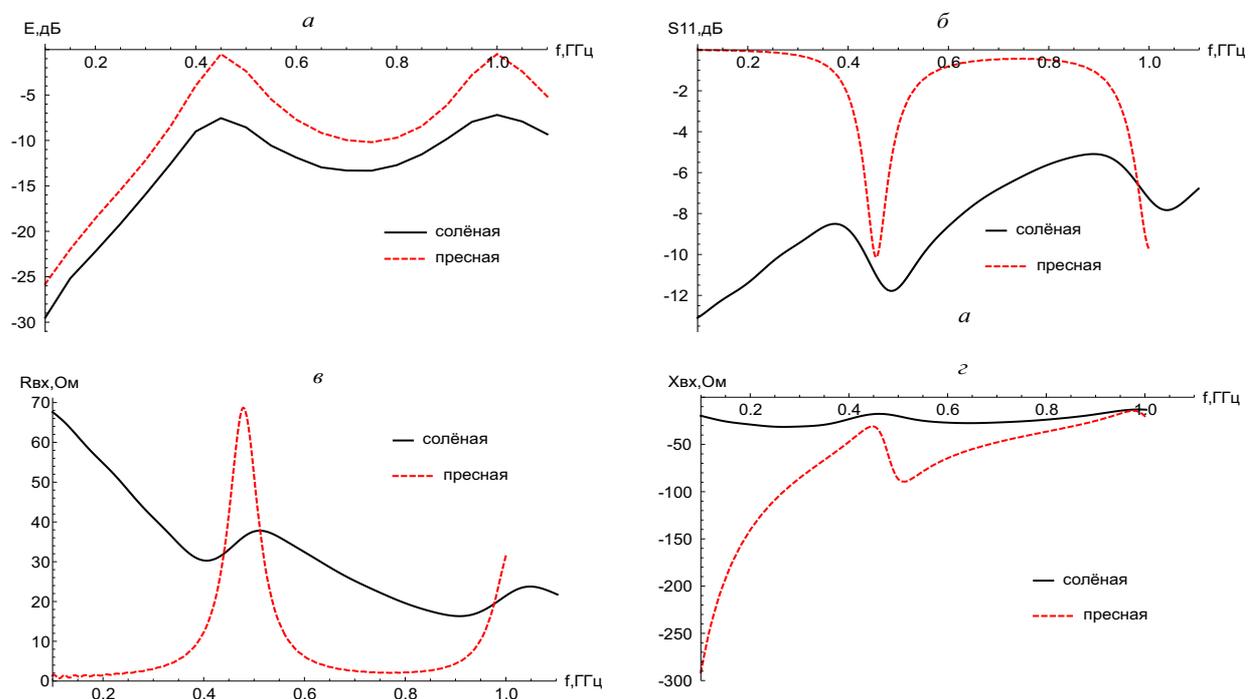


Рис. 3: Сравнительный анализ частотных зависимостей характеристик антенны для солёной и пресной воды: *а* — к.п.д. антенны; *б* — коэффициент отражения от входа S_{11} ; *в* — активное входное сопротивление; *г* — реактивное входное сопротивление

плоскости на частоте 446 МГц (пресная вода обеспечивает на 12 градусов более широкую ДН).

В диапазоне частот 2.1 ГГц характеристики антенн с пресной и соленой водой различаются уже не так сильно, однако к.п.д. при использовании солёной воды

оказывается на 4.76 дБ ниже и достигает -10 дБ.

Антенна без воды имеет неплохие характеристики, а с водой — приемлемые. Она имеет и хорошие эстетические качества; при этом её характеристики достаточны для обеспечения связи с находящимися побли-

зости устройствами. Изменением металлических элементов конструкции, а также радиуса струи и скорости течения жидкости, можно регулировать её характеристики. Определим диапазоны эффективной работы антенны по величине полного к.п.д. (полной эффективности), учитывающей как отражение от входа антенны (характеризуемое величиной S_{11} в дБ), так и потери при передаче энергии в окружающее пространство.

Наиболее привлекательными диапазонами частот для организации связи на малые расстояния в настоящее время являются:

- 433.075 — 443.775 (МГц) для устройств LPD (Low Power Devices) — маломощных, менее 10 мВт устройств;
- 446.000 — 446.100 (МГц) для устройств PMR (Private Mobile Radio) с мощностью передатчика менее 0.5 Вт;
- нижний из диапазонов Wi-Fi - около 2.1 ГГц.

Для первого из диапазонов частот лучшая из проанализированных длина штыря равна 200 мм, она позволяет обеспечить эффективность антенны —12.5 дБ. При увеличении длины штыря эффективность падает, однако остаётся в приемлемых для коротких антенн границах до 229 мм. Аналогичный вывод следует и для второго диапазона — результаты ухудшаются с увеличением длины штыря. С диапазоном 2.1 ГГц дело обстоит хуже — к этим частотам эффективность антенны падает, и лучший из вариантов — 200 мм штырь — позволит обеспечить лишь —15.5 дБ.

Таким образом, антенна может обеспечивать связь в этих диапазонах частот, хотя и с более низкой эффективностью, т.е. в пределах меньшей зоны покрытия, чем чисто металлическая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была построена гидродинамическая модель капиллярного распада цилиндрической струи жидкости, на основе которой было проведено численное электродинамическое моделирование антенного элемента. Моделирование позволяет говорить о принципиальной возможности создания антенных элементов на основе жидких диэлектриков. Удалось построить модель жидкой антенны для LPD/PMR связи. Очевидно, что наличие электромагнитного поля существенным образом скажется на изменении формы свободной поверхности струи жидкости. Для толстых струй дополнительно необходимо производить учет влияния силы тяжести. В связи с вышесказанным настоящая модель может служить лишь начальным приближением для оценки параметров антенного элемента, выполненного на основе жидкого проводника или диэлектрика.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору физ.-мат. наук С. О. Ширяевой и доктору физ.-мат. наук Д. Ф. Белоножке за консультации и ценные советы при проведении настоящего исследования.

-
- [1] *Jing Zhang, Chao Liu, Liang Zhou, Yu Feng Dai // Advanced Materials Research. 2013. 716. P. 586.*
- [2] *Chao Feng, Fu-ping Deng, Liang Zhou, Guang Hong and Wei-xin Zhang // IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2016. Beijing, 2016. P. 826.*
- [3] *Kosta Y., Kosta S. // IEEE Antennas and Propagation Society Symposium. 2004. USA, Monterey. CA. 2004. 3. P. 2392.*
- [4] *O'Keefe S.G., Kingsley S.P. // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2007. 6. P. 533.*
- [5] *Fayad H., Record P. // Electronics Letters. 2006. 42, N3. P. 133.*
- [6] *Kar S.J., Chakrabarty A., Sarkar B.K. // IEEE Middle East Conference on Antennas and Propagation. (MECAP 2010). Cairo, 2010, pp. 1-6.*
- [7] Пат. 9537203 США, МКИ H01Q1/08; H01Q1/10; H01Q1/36. Antenna device/ *Akimoto S., Yanagi T., Fukasawa T.* (Japan); Mitsubishi Electric Corporation, Tokyo (Japan). – N JP2015/051875; Заяв. 23.01.2015; Оpubл. 02.01.2017. – 16 с., 15 л. ил.
- [8] Пат. 8169372 США, МКИ H01Q1/26. Electrolytic fluid antenna/ *Tam D. W. S.*, San Diego, CA (US); The United States of America as represented by the Secretary of the Navy, Washington, DC (US). – N 13/012,575; Заяв. 24.01.2011; Оpubл. 02.01.2017. – 13 с., 9 л. ил.
- [9] *Rayleigh L. // Proceedings of the London mathematical society. 1878. 1, N1. P. 4.*
- [10] *Левич В. Г. // Физико-химическая гидродинамика. 2-е изд. М.: ГИФМЛ, 1959.*
- [11] *McGoldrick L. F. // J. Fluid Mech. 1972. 52, N4. P. 723.*
- [12] *Nayfeh A. H. // J. Fluid Mech. 1971. 48, N3. P. 463.*
- [13] *Очиров А. А. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2018. № 6. 1860301.*
-

On the modelling and analysis of properties a cylindrical jet of fluid as an antenna element

A. A. Ochirov^a, T. K. Artyomova^b, S. V. Khodyrev

*Department of Infocommunications and Radiophysics of the Faculty of Physics, P. G. Demidov Yaroslavl State University
Yaroslavl 150003, Russia*

E-mail: ^aotchirov@mail.ru., ^bartemova@uniyar.ac.ru.

A mathematical model of an antenna element made of a cylindrical jet of liquid is considered. The effect of capillary jet decay on the surface shape and, as a consequence, on the gain and directivity characteristics of the antenna is considered. Asymptotic analytical expressions are obtained for the surface shape without taking into account the influence of the electromagnetic field.

PACS: 47.35.Pq, 84.40.Ba.

Keywords: antenna, a cylindrical fluid jet, capillary decay of the jet, characteristics, modeling.

Received 2019.

Сведения об авторах

1. Очиров Артем Александрович — ст. преподаватель; тел.: (4852)79-77-70, e-mail: otchirov@mail.ru.
 2. Артёмова Татьяна Константиновна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (4852)79-77-70, e-mail: artemova@uniyar.ac.ru.
 3. Ходырев Святослав Витальевич — студент; тел.: (4852)79-77-70, e-mail: sv-khodyrev@mail.ru.
-