

03

Капиллярно-волновой варп-двигатель

© В.А. Александров

Институт механики Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, Ижевск, Россия

E-mail: ava@udman.ru

Поступило в Редакцию 2 июня 2021 г.

В окончательной редакции 2 июня 2021 г.

Принято к публикации 27 июля 2021 г.

Обнаружена и исследована генерация поверхностного потока воды в каналах с источниками и резонаторами капиллярных колебаний. Демонстрируются движущиеся устройства с капиллярно-волновым ускорителем поверхностного потока жидкости. Поверхностный поток жидкости в канале генерируется из-за локальной деформации поверхности жидкости капиллярными колебаниями и образования избыточной поверхности жидкости в среднем вблизи источника и переноса этой поверхности волнами.

Ключевые слова: капиллярные колебания и волны, поверхностный поток жидкости, канал.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51719.18899

Капиллярные колебания и волны, возбуждаемые вибрирующими стержнями и пластинами на свободной поверхности жидкости, создают в жидкости поверхностные течения [1]. Возбуждение двумерных капиллярных, в частности в виде ряби Фарадея, и образование поверхностных потоков являются пороговыми, что характерно для параметрического возбуждения нелинейных волн конечной амплитуды. При достаточно больших амплитудах колебаний источника капиллярные колебания и волны могут проявлять нелинейность, связанную с локальной деформацией свободной поверхности жидкости вблизи источника, при котором возможно проявление эффективного вибрационного поверхностного натяжения жидкости и вибрационной конвекции Марангони [2].

Целью настоящей работы является исследование генерации поверхностного потока жидкости капиллярными колебаниями, возбуждаемыми источником и резонатором в плоском канале.

Наблюдения потоков, создаваемых на поверхности воды горизонтально расположенной вибрирующей пластиной, показали, что генерация потоков возможна источниками, распределенными на свободной поверхности жидкости. С помощью исследований капиллярных волн, возбуждаемых концами двух синфазно вибрирующих стержней на поверхности воды в чашке Петри, было установлено, что эти источники генерируют разнонаправленные потоки так же, как и часть вибрирующей пластины. Чтобы создать однонаправленный поток, поверхность жидкости была ограничена каналом, в центре которого устанавливался четвертьволновой резонатор капиллярных волн с U -образной полостью. Конструкции канала и резонатора изготовлены из стальных пластин толщиной 0.1 мм. При возбуждении капиллярных колебаний определенной частоты источником, подведенным к жидкости в канале напротив открытой полости резонатора, на участке поверхности жидкости, ограниченном полостью резонатора, возбуждаются стоячие капиллярные волны, которые при наложении на капиллярные колебания

вблизи источника увеличивают их амплитуду. Источник совместно с резонатором на поверхности жидкости в канале возбуждает полуцилиндрические бегущие волны, которые интерферируют с волнами, отраженными от стенок канала. В результате на поверхности жидкости в канале возбуждаются двумерные бегущие капиллярные волны, для которых эта поверхность жидкости представляет собой плоский волновод, ограниченный шириной и длиной канала. При наличии щелей между резонатором и стенками канала капиллярные колебания в канале создают направленный поверхностный поток жидкости, затекающий в канал через эти щели.

Обнаружено, что эффективный поверхностный поток воды создается в канале, когда ширина щелей между резонатором и стенками канала равна ширине полости резонатора. На рис. 1, *a* показана картина волн и течений на поверхности воды в чашке Петри при возбуждении капиллярных колебаний на участке поверхности воды, ограниченном каналом размером 28×12 мм, в котором стержневой источник капиллярных колебаний расположен напротив открытой полости U -образного резонатора размером 8×4 мм в центре канала. Поток состоит из двух плоских течений, ускорение частиц в которых происходит на участках поверхности воды непосредственно вблизи краев резонатора капиллярных колебаний напротив источника. Токи в этих течениях замыкаются за пределами конструкции канала. Кроме того, на поверхности воды также наблюдаются вторичные вихревые течения по двум сторонам потока, исходящего из канала. Поверхностный поток со скоростью 18 мм/с, создаваемый этим же источником, обнаружен также в круговом канале шириной 15 мм, в котором установлен резонатор с полостью шириной 5 мм (рис. 1, *b*).

Движущийся поток частиц поверхности жидкости в канале несет импульс. Соответственно в силу законов сохранения возможно получение движения незакрепленного устройства с каналом, резонатором и источником

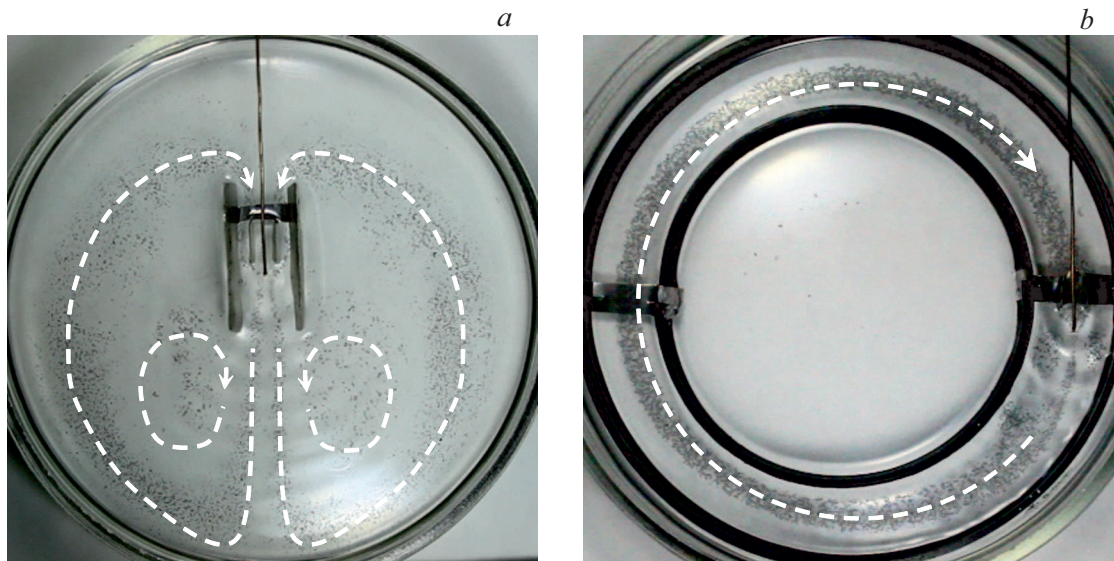


Рис. 1. Волны и течения в прямоугольном (а) и круговом (б) каналах, создаваемые капиллярными колебаниями частотой 56 Hz.

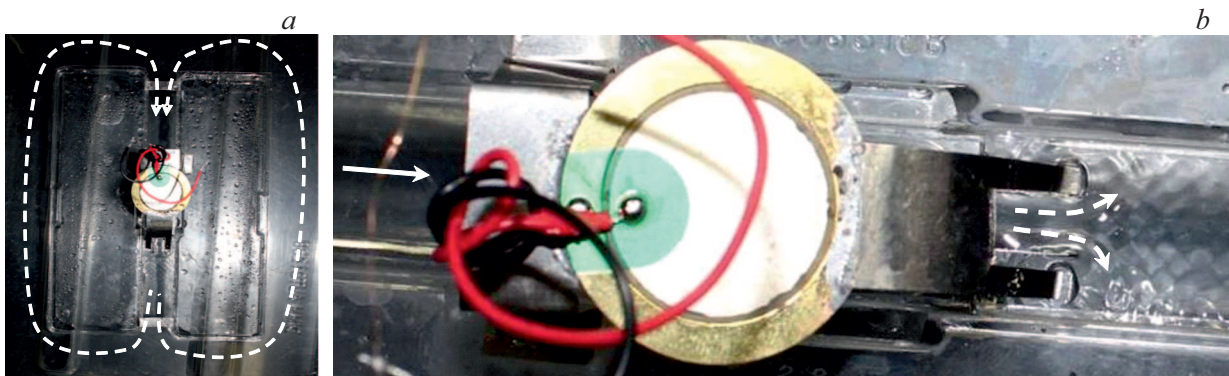


Рис. 2. Устройство с капиллярно-волновым двигателем. а — общий вид, б — волны и поток в канале при колебаниях осцилляторов частотой 214 Hz.

капиллярных колебаний на поверхности жидкости в обратном направлении к потоку в канале.

Устройство с капиллярно-волновым двигателем показано на рис. 2, а. Его корпус собран из двух полимерных лотков прямоугольной формы размером $145 \times 45 \times 8$ mm, соединенных с зазором шириной 15 mm между ними. На противоположных сторонах зазора к лоткам приклеены пластины L-образной формы, длинные стороны пластин и обращенные к ним стороны лотков образуют U-образные полости размером 10×5 mm. Между пластинами оставлена щель шириной 5 mm. На корпусе устройства установлен пьезоэлектрический преобразователь FML-27T-3.9A1-100 с пластинчатым волноводом шириной 12 mm и толщиной 0.1 mm, от свободного торцевого края пластины отведены два коротких осциллятора шириной 2 mm. Вес устройства составляет $16 \cdot 10^{-3}$ kg. При размещении устройства на поверхности воды его корпус смачивается водой и между лотками образуется канал. При

подключении пьезоэлектрического преобразователя к источнику переменного тока осцилляторы в устройстве возбуждают в канале бегущие капиллярные волны с распределенной амплитудой. При возбуждении капиллярных колебаний в интервале определенных частот в канале создается направленный поток. При этом устройство движется в противоположном направлении к потоку в канале. Скорости потока являются максимальными при колебаниях осцилляторов частотой 76 и 214 Hz. Засеивание поверхности воды трассерными частицами показало, что поток, выходящий из канала, разделяется на два замкнутых потока, огибающих корпус устройства и входящих в канал с противоположной стороны. Движения устройства наблюдались также и при других частотах (616 и 704 Hz) возбуждения волн, но из-за малости их амплитуды эти волны практически не заметны. При подаче на электроды пьезопреобразователя напряжения частотой 3.5 kHz устройство приобретает достаточно большую скорость в 60 mm/s, так как при



Рис. 3. Движущиеся устройства и картина двумерных капиллярных волн при колебаниях источников в устройствах частотой 46 (а) и 137 Hz (b).

этом происходит возбуждение резонансных колебаний самого преобразователя и образование струй воды, исходящих из-под краев осцилляторов.

На рис. 2, b представлена картина двумерных волн в канале устройства, возбуждаемых двумя осцилляторами при их синфазных колебаниях частотой 214 Hz. Сплошной стрелкой показано направление движения поверхностного потока на невозмущенном волнами участке свободной поверхности воды в канале, штриховыми стрелками показаны части траекторий движения трассерных частиц в потоке вблизи краев четвертьволновых резонаторов капиллярных колебаний, где происходит ускорение движения частиц в поверхностном потоке. При указанной частоте возбуждения волн средняя скорость движения частиц на участке с невозмущенной свободной поверхностью воды составила 20 mm/s, а скорость движения устройства — 3 mm/s.

Также были изготовлены движущиеся устройства с корпусом из пустотелых полимерных цилиндров диаметром 12 mm и длиной 75 mm, на которые были установлены резонатор, пьезопреобразователь и источник капиллярных колебаний, генерирующие направленный поток в канале. На рис. 3, a показано устройство с одним резонатором в канале шириной 10 mm и одним пластинчатым источником капиллярных колебаний, присоединенным к пьезопреобразователю 7NB-31R2DM-1. При подаче на электроды пьезопреобра-

зователя переменного напряжения амплитудой 20 V и частотой 46 Hz устройство весом $8 \cdot 10^{-3}$ kg движется со скоростью 8 mm/s. Второе устройство с капиллярно-волновым движителем (рис. 3, b) содержит корпус из пустотелых цилиндров с зазором между ними шириной 15 mm. К цилиндрам в зазоре симметрично приклеены загнутые пластины L-образной формы шириной 8 mm, длинные стороны пластин и обращенные к ним стороны цилиндров образуют U-образные полости размером 12×5 mm. Между пластинами оставлена щель шириной 5 mm. Цилиндры склеены металлическими скобами, на одну из них установлен пьезоэлектрический преобразователь FML-27T-3.9A1-100 с двумя осцилляторами из металлических стержней диаметром 0.6 mm и длиной 30 mm. При размещении устройства на поверхности воды и подаче на электроды пьезопреобразователя переменного напряжения частотой 137 Hz стержни вибрируют на одной из резонансных частот капиллярных колебаний и возбуждают двумерные бегущие волны в канале, которые создают направленный поверхностный поток воды. При напряжении амплитудой 20 V на электродах пьезопреобразователя устройство движется со скоростью 20 mm/s. Амплитуда колебаний концов стержней в контакте с водой не превышает 0.1 mm.

Генерацию направленного поверхностного потока жидкости в каналах с источниками и резонаторами

капиллярных колебаний и волн можно объяснить следующим образом.

Источник и резонатор периодически возбуждают капиллярные колебания конечной амплитуды, локально искривляя и деформируя свободную поверхность жидкости в канале. При этом вблизи источника элемент свободной поверхности жидкости ΔS_0 приобретает избыточную поверхность ΔS_v в среднем. Относительная деформация $\bar{\delta}$ в среднем (далее просто деформация) элемента поверхности жидкости при капиллярных колебаниях может быть выражена как $\bar{\delta} = \Delta S_v / \Delta S_0$. Плотность избыточной поверхностной энергии вибрирующей жидкости при этом составит $\bar{w}_s = \bar{\delta}\sigma$, где σ — поверхностное натяжение.

Согласно экспериментам, капиллярные колебания, возбуждаемые источником на поверхности воды в канале, из-за отражения резонатором распространяются в виде бегущих волн только в одном направлении. Волны несут за собой энергию, при этом плотность потока поверхностной энергии, переносимой капиллярной волной, равна величине вектора Умова: $\mathbf{S}_U = w_s c_c \mathbf{n}$, где w_s — плотность поверхностной энергии, c_c — скорость капиллярной волны, \mathbf{n} — единичный вектор. Средняя величина вектора Умова равна интенсивности волны $I_s = \bar{w}_s c_c$. Плотность энергии в полуцилиндрической волне, так же как и в цилиндрической, с расстоянием от источника уменьшается. Поэтому выражение для плотности избыточной поверхностной энергии в волне запишется в виде $\bar{w}_s = \sigma \bar{\delta}_0(r_0/r)$, где $\bar{\delta}_0$ — максимальная величина деформации поверхности жидкости, приходящаяся на участок поверхности на расстоянии r_0 от центра контакта источника с жидкостью, $r \geq r_0$ — расстояние от источника.

В этом случае $I_s = \sigma \bar{\delta}_0(r_0/r)c_c$, а плотность импульса в волне в среднем при этом равна

$$\bar{p}_s = (\bar{w}/c^2)c = I/c^2.$$

Поток поверхностной энергии dW_s/dt в среднем на расстоянии r от источника полуцилиндрической капиллярной волны равен произведению интенсивности волны и дуги $L = \pi r$: $dW_s/dt = I_s K = \pi r_0 \sigma \bar{\delta}_0 c_c$. Энергию, перенесенную волной за период T колебаний источника, можно найти из интеграла $dW_s = \int_0^T \pi r_0 \sigma \bar{\delta}_0 c_c dt$. Она равна $\Delta W_s = \pi r_0 \sigma \bar{\delta}_0 c_c T$ и пропорциональна избыточной поверхности жидкости $\Delta S = \pi r_0 \bar{\delta}_0 \lambda_c$, создаваемой источником за период колебаний. Поскольку $\lambda_c = c_c T$, энергия, переносимая волной за период колебаний, равна $\Delta W_s = \sigma \Delta S$. В таком случае волной переносится и избыточная поверхность S_δ жидкости, поток которой равен $dS_\delta/dt = (1/\sigma)dW_s/dt = \pi r_0 \bar{\delta}_0 c_c$ и имеет размерность m^2/s . Плотность потока избыточной поверхности жидкости при этом равна потоку деформации поверхности жидкости $s_\delta = \bar{\delta} c_c$ с размерностью m/s .

Ускорение частиц жидкости в поверхностном потоке в канале можно объяснить градиентом деформации поверхности капиллярными колебаниями. Про-

изводная от плотности импульса волн равна произведению поверхностного натяжения и градиента деформации: $d\bar{p}_s/dt = \partial \bar{w}_s / \partial r = \sigma \text{grad } \bar{\delta}$. Считая, что импульс волн передается частицам поверхности жидкости, уравнение движения частиц поверхности жидкости можно записать в виде $\rho_s du_s/dt = -\sigma \text{grad } \bar{\delta}$. Отсюда ускорение частиц поверхности жидкости равно $du_s/dt = (\sigma k / \rho_l) \text{grad } \bar{\delta} = c_c^2 \text{grad } \bar{\delta}$.

Принцип генерации направленного поверхностного потока в канале с источником и резонатором капиллярных колебаний, вероятно, может найти приложение для разработки генераторов направленных электромагнитных потоков в волноводах со встроенными в их полости резонаторами и источниками электромагнитных колебаний.

Движущиеся устройства с направленным поверхностным потоком в канале можно сравнить с гипотетическим варп-двигателем Алькубьерре [3], который должен двигаться в пространстве за счет локальной деформации ткани пространства впереди себя и расширения пространства позади двигателя. В устройствах с капиллярно-волновым генератором поверхностного потока жидкости источник и резонатор капиллярных колебаний локально деформируют свободную поверхность воды в канале, образуя избыточную искривленную поверхность в среднем, которая переносится волнами в канале в виде поверхностного потока, расширяющегося в канале и за каналом.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.А. Александров, С.П. Копысов, Л.Е. Тонков, ЖТФ, **89** (7), 998 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47787.234-18 [V.A. Aleksandrov, S.P. Kopysov, L.E. Tonkov, Tech. Phys., **64** (7), 939 (2019). DOI: 10.1134/S106378421907003X].
- [2] S. Shklyayev, A.A. Alabuzhev, M. Khenner, Phys. Rev. E, **92**, 013019 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.92.013019
- [3] M. Alcubierre, Class. Quantum Grav., **11**, L73 (1994). DOI: 10.1088/0264-9381/11/5/001