

М. Д. Д и е в, Д. Н. И л ь м о в,
А. П. К у б ы ш к и н

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В ЭЛЕКТРОЛИЗЕРЕ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

На основе численного моделирования проведено исследование гидродинамических особенностей течения воды в гидравлическом тракте твердополимерного электролизера в условиях микрогравитации. Изучены пространственная структура течения и величины основных гидродинамических параметров в системе каналов электролизера. Полученные данные являются исходными для дальнейшего изучения процессов массопереноса, в том числе связанных с двухфазностью реального течения.

Ключевые слова: электролиз, получение кислорода, ламинарное течение, массообмен, микрогравитация.

В настоящее время электролиз воды — это основной способ снабжения кислородом экипажей космических аппаратов. Наиболее перспективными являются электролизные установки на основе использования твердополимерных ионообменных мембран. Создание такой установки для кислородообеспечения в условиях космоса нуждается в анализе особенностей массообменных процессов при микрогравитации. В настоящей работе рассматривается электролизер с твердополимерной мембраной.

Электролизер состоит из секций или ячеек, собранных в блок. Каждая секция содержит два электрода с расположенной между ними ионообменной мембраной. Электроды представляют собой пластины из пористого металла. С внешних сторон электродов расположены щелевидные полости для подачи воды и выведения газов. Внешние поверхности электродов являются проницаемыми стенками этих полостей. В межэлектродном пространстве расположены электропроводящие металлические вставки, передающие механическую нагрузку. Вода подается в одну из полостей, в нашем случае в катодную полость. Электрохимические реакции протекают на границах между электродами и мембраной. Образующиеся газообразные продукты разложения воды (кислород и водород) эвакуируются через поры электродов в полости и затем удаляются из электролизера. Подводящие и отводящие коллекторные каналы пронизывают блок перпендикулярно секциям и соединены с межэлектродными полостями небольшими прорезями. Таким образом, гидравлический тракт системы состоит из межэлектродных полостей, соединенных через прорези с подводящими (отводящими) каналами коллекторов.

Процессы массопереноса в гидравлическом тракте электролизера определяют подвод исходного вещества (воды) и отвод продукта

реакции (водорода). На критических режимах работы подвод воды сквозь слой пористого титана к твердополимерной мембране в условиях микрогравитации может лимитироваться эффектами, связанными со скоплением водородных пузырьков в полостях и каналах. Для решения двухфазной задачи на первом этапе необходимо провести моделирование течения однофазной жидкости в гидравлическом тракте электролизера. Распределения параметров (скорости и давления), полученные на этом этапе, послужат исходными данными для дальнейшего изучения процессов массопереноса, в том числе для изучения поведения пузырьков водорода с учетом возможности их налипания на твердые поверхности.

Постановка модельной задачи. Рассмотрим течение воды в гидравлическом тракте электролизера, состоящего из межэлектродных полостей 12 секций, параллельно соединенных с каналами 11 подводящих и 11 отводящих коллекторов. Размеры в плоскости секций составляют 200×200 мм. Жидкость однофазная несжимаемая. Задача стационарная. Поскольку скорости течения во всех элементах электролизера невелики, режим течения считается ламинарным. На стенках используется гипотеза прилипания.

Численно решаются стационарные уравнения сохранения массы и количества движения для несжимаемой жидкости [1]:

$$\nabla \vec{V} = 0; \quad (1)$$

$$\rho (\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{V} + \rho \vec{g}; \quad (2)$$

здесь \vec{V} , ρ — скорость и плотность жидкости; p — статическое давление; μ — динамическая вязкость; $\rho \vec{g}$ — сила тяжести.

В условиях микрогравитации сила тяжести невелика. Далее сила тяжести учитываться не будет.

Приведенные уравнения (1) и (2) решаются в трехмерной области расчетной модели. В целях экономии машинной памяти для построения модели введены следующие упрощения.

1. Для удобства построения прямоугольной сетки форма сечения каналов выбрана не круглой, а квадратной. Сторона квадрата принята равной диаметру канала, чтобы эквивалентные диаметры [2]

$$d_3 = 4S/\Pi \quad (3)$$

реального и расчетного каналов совпадали (S — площадь; Π — периметр).

2. Все подводящие (отводящие) каналы можно приблизительно считать равноценными. Тогда достаточно рассмотреть только одну пару каналов (подводящий канал и отводящий) и часть межэлектродного пространства 12 секций между ними, ограниченную условиями симметрии.

Геометрия расчетной области модели 1 выбрана согласно принятым упрощениям и показана на рис. 1. Она построена по размерам

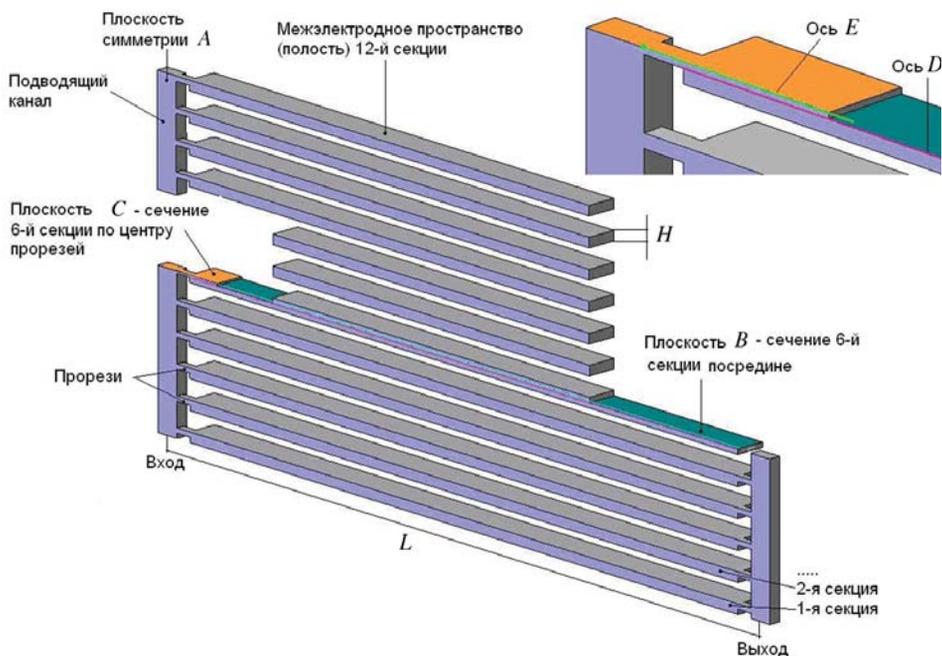


Рис. 1. Геометрия расчетной области модели 1:
 ось D — пересечение плоскостей A и B , ось E — A и C

действующего экспериментального электролизера. Расстояние L между центрами подводящего и отводящего каналов составляет 200 мм, толщина межэлектродной полости $H = 2,6$ мм. На рис. 1 элементы изображены в соответствующем масштабе. Построена прямоугольная неравномерная расчетная сетка, ее наименьший шаг в прорезях составляет 0,1 мм.

Для простоты в модели 1 гофрированные вставки в межэлектродном пространстве не учитываются. Сначала рассмотрим результаты решения по модели 1 при одном из рабочих расходов, а затем приведем решения при других расходах и при изменении геометрии. На рис. 1 показаны характерные плоскости A , B , C и оси D , E , для которых будут приведены распределения гидродинамических параметров.

Расчет по модели 1 при одном из рабочих расходов. Задаваемыми условиями являются расход жидкости ($Q = 40 \text{ см}^3/\text{с}$ для 11 подводящих каналов) и нулевое постоянное избыточное давление в выходном сечении (0 Па).

На рис. 2 показано поле модуля скорости в плоскости A . Рисунок дает общее представление о распределении скорости в системе. При заданном расходе наибольшая скорость достигает 0,134 м/с в прорезях нижних (ближних к входу) секций. Скорость неодинакова как по разным секциям, так и внутри них. Имеются застойные зоны, где могут скапливаться пузырьки газа, что ухудшает циркуляцию воды в электролизере. Обратим внимание, что перед входом в последнюю секцию (верхняя часть подводящего канала) тоже имеется застойная зона, и

если газ каким-либо образом попадет во входной коллектор, он может накапливаться, закупоривая прорезь последней секции.

Распределение расхода воды по различным секциям электролизера приводится далее.

Рассмотрим течение жидкости по ширине секций.

Для этого представлены поля продольной осевой скорости

в центральных сечениях двенадцатой, шестой (плоскость B) и первой секций (рис. 3).

Как видно, от входной прорези бьет струя, а вокруг нее создается область застоя или даже возвратное течение.

Чем выше скорость во входной прорези (первая секция), тем неоднороднее ее распределение. На рис. 3 в том же масштабе по продольной координате помещен график осевой скорости по осям D и E для шестой секции.

На графике можно приблизительно определить точку выравнивания течения в шестой секции — около 35 мм от выхода из прорези. Из рисунка также видно, как

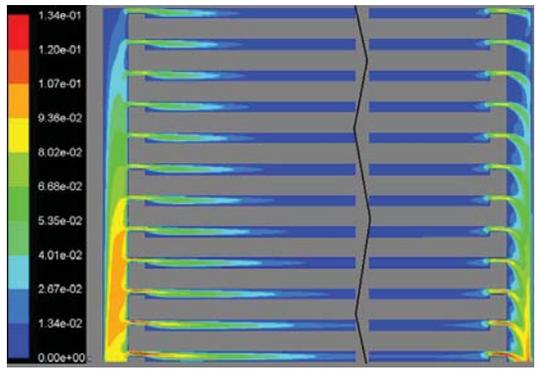


Рис. 2. Скорость воды (по модулю) v , м/с, в плоскости A

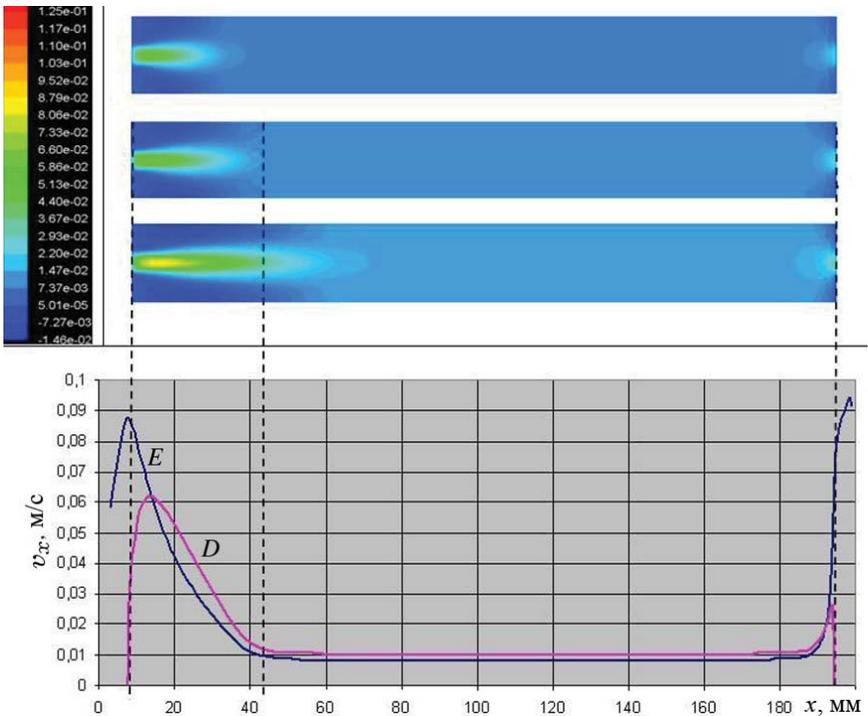


Рис. 3. Поле осевой скорости в центральном сечении двенадцатой, шестой и первой секций; значения осевой скорости вдоль осей D и E — для шестой секции (координата $x = 0$ соответствует центру подводящего канала)

соотносятся скорости в центре секции — ось D и по центру прорезей — на оси E .

Общее гидросопротивление системы при заданном расходе крайне невелико и составляет около 30 Па. Отметим, что давление поверхностного натяжения в пузырьке диаметром 1 мм на порядок больше, следовательно, влияние капиллярных эффектов (прилипание пузырьков к стенкам) может проявляться значительно. В условиях микрогравитации статическое давление в верхних (дальних от входа) секциях оказалось несколько больше, чем в нижних. Этот эффект можно сопоставить с эффектом, возникающим при движении жидкости по расширяющейся трубе. Наибольшие перепады давлений (гидросопротивления) наблюдаются в прорезях. Это отчетливо видно на рис. 4. На нем приведена зависимость статического давления в средней шестой, секции от продольной координаты вдоль оси E . Начальный и конечный участки с большим градиентом — изменение давления в прорезях.

Из графика следует, что гидросопротивление шестой секции составляет около 11 Па.

Оценим среднее сопротивление секции, пренебрегая местными потерями:

$$Dp = 2Dp_{\text{пр}} + Dp_c, \quad (4)$$

где $Dp_{\text{пр}}$ — сопротивление прорезей, определяемое по формуле

$$Dp_{\text{пр}} = 32\mu \frac{L_{\text{пр}}v_{\text{пр}}}{d_{\text{э,пр}}^2} \approx 2,1 \text{ Па},$$

в которой $\mu = 0,001003 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ — динамическая вязкость; $L_{\text{пр}} = 4,4 \text{ мм}$ — длина прорези; $d_{\text{э,пр}} \approx 2 \text{ мм}$ — эквивалентный диаметр по уравнению (3), средняя скорость в прорези на данном режиме $v_{\text{пр}} \approx 0,06 \text{ м/с}$. Входящее в уравнение (4) сопротивление оставшейся части секции Dp_c определяется по формуле

$$Dp_c = 32\mu \frac{L_c \tilde{v}}{d_{\text{э,с}}^2} \approx 2,2 \text{ Па}.$$

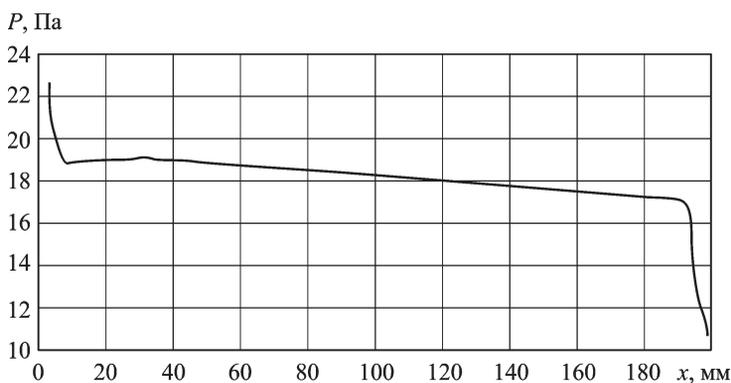


Рис. 4. Статическое давление вдоль оси E в шестой секции (координаты начала и конца кривой графика соответствуют входу в прорезь из подводящего канала и выходу в отводящий канал)

Здесь $L_c = 186,8$ мм — длина секции; $d_{3,c} \approx 4,5$ мм — эквивалентный диаметр по уравнению (3); $\tilde{v} \approx 0,0073$ м/с — средняя по расходу скорость в межэлектродной полости.

Гидросопротивление, рассчитанное по уравнению (4), $Dp \approx 6,4$ Па примерно соответствует сопротивлению секции, полученному в результате моделирования. Из-за пренебрежения местными потерями получают меньшее значение сопротивления. Сопротивление основной части секции $Dp_c \approx 2,2$ Па практически совпадает с результатом моделирования.

Общее сопротивление системы должно быть соизмеримо с сопротивлением одной из секций.

Расчет по модели 2 с гофрированными вставками. Гофрированные вставки внутри межэлектродных полостей секций гидравлического тракта электролизера могут значительно изменить характер течения. Однако возможности моделирования ячеек со вставками ограничены объемом машинной памяти. Для создания модели 2 с гофрами пришлось пойти на следующее упрощение. Вместо шестигранного скругленного профиля гофр, создан прямоугольный профиль, толщина которого соответствует минимальному шагу сетки модели 2 ($d = 0,2$ мм). Поскольку толщина гофра равна шагу сетки, то расчет на участках рассечения потока гофром имеет несколько условный характер. Несмотря на свои недостатки, модель 2 значительно ближе к реальному электролизеру. С ее помощью можно оценить особенности течения в электролизере с продольными гофрированными вставками. Число вставок в каждой ячейке равно 6. Ширина паза между смещенными на половину шага гофрированными вставками $Z = 1$ мм, шаг профиля $h = 4$ мм. На рис. 5 приведены часть одной из 12 секций расчетной области модели 2, профиль гофра, а также характерные секущие плоскости. Плоскости F, G рассекают секцию перпендикулярно потоку посредине первой и второй от подводящего канала вставок, плоскости C и K расположены на уровне $H/4$ от верхней и нижней стенок.

На рис. 6 показаны поля осевой скорости в сечениях для 6-й секции модели 2. В процентах приведен относительный расход через определенный канал гофра. За 100 % принят расход воды через проходное сечение ячейки, ограниченное условиями симметрии. Из рис. 6 видно, что течение в первой от входа и последней гофрированной вставке сильно неоднородно. Больше половины относительного расхода приходится на несколько каналов в гофрах, расположенных против прорезей (сечение F). Но в отличие от крайних гофрированных вставок во внутренних вставках течение значительно выравнивается (сечение G).

В модели без гофрированных вставок получено, что чем выше скорость воды, тем ярче выражена струя в межэлектродном пространстве. В модели с гофрированными вставками получено, что относительное распределение скоростей внутри межэлектродного пространства ячейки главным образом определяется геометрией гофр и в меньшей степени зависит от скорости прокачки воды.

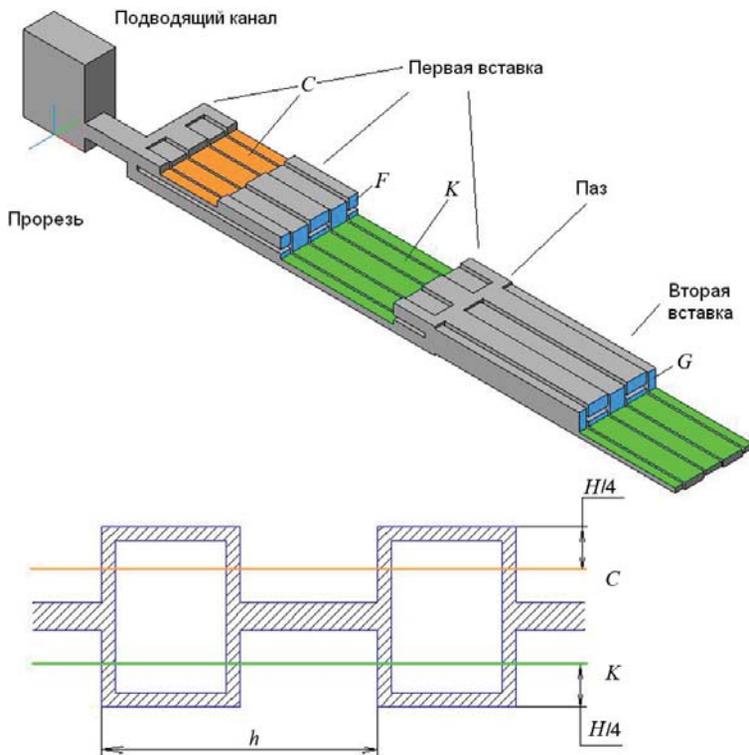


Рис. 5. Элемент расчетной области и профиль гофра модели 2

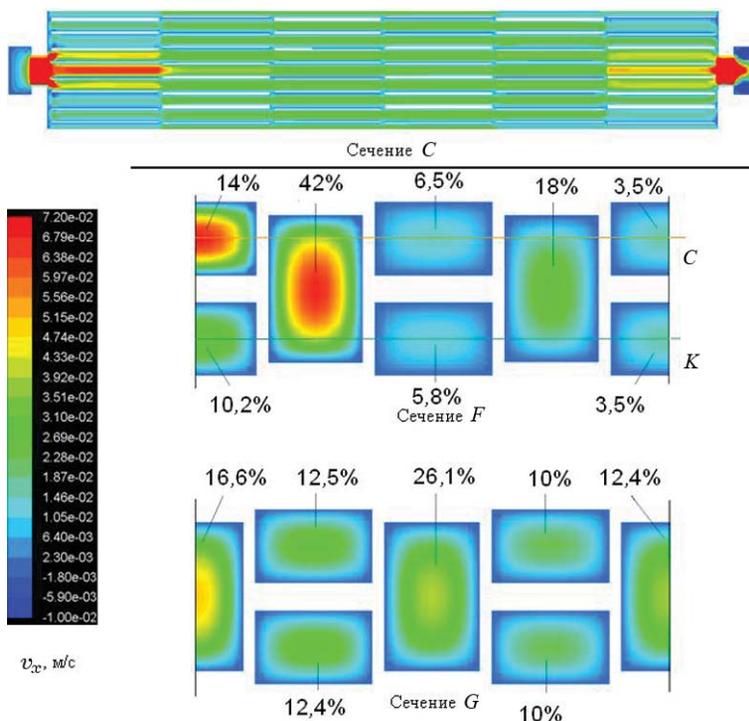


Рис. 6. Поля осевой скорости в сечениях C, F, G при $Q = 80 \text{ см}^3/\text{с}$

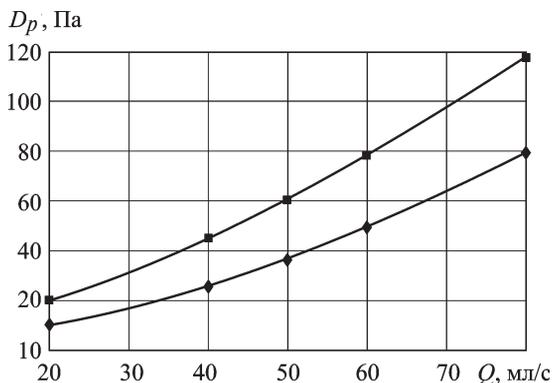


Рис. 7. Общее гидросопротивление моделей 1 (—◆—) и 2 (—■—) в зависимости от расхода

Обобщение результатов. Рассмотрим общие параметры, характеризующие течение в моделях 1 и 2 при различной скорости прокачки воды. Одним из них является общее гидросопротивление моделей D_p (рис. 7) для обеих моделей в зависимости от общей подачи воды. С увеличением расхода оно увеличивается, причем несколько нелинейно.

Как и следовало ожидать, сопротивление всего гидравлического тракта имеет тот же порядок, что и сопротивление отдельной секции, так как в тракте секции соединены параллельно.

В модели с гофрами сопротивление оказалось в 1,5–2 раза выше, чем в модели без гофр. Этот результат можно объяснить следующими соображениями. В первом случае трение в ячейке происходило на двух поверхностях (верхней и нижней стенках), характерный размер между которыми H . Во втором случае трение возникает на четырех поверхностях — еще и на боковых стенках канала гофр, характерное расстояние между которыми также примерно H . Следует отметить, что местные сопротивления (например, пазы между вставками) при ламинарном режиме течения не имеют такого значительного влияния, как при турбулентном.

Еще одним общим показателем, характеризующим гидродинамику в электролизере, является относительный расход жидкости через различные секции (рис. 8). По оси абсцисс отложены номера секции (первая — ближняя ко входу нижняя секция; 12-я — дальняя, верхняя секция), по оси ординат — расход q через секцию, отнесенный к среднему расходу через все секции. Среднему расходу ($q = 1$) во всех вариантах хорошо соответствует расход через пятую или шестую секцию.

В модели без гофрированных вставок неравномерность течения по параметру q выше, и она уменьшается при увеличении подачи воды. При рабочих режимах ($Q = 20 \dots 80 \text{ см}^3/\text{с}$) относительный расход через первую секцию приблизительно на 30 % больше среднего, а через 12-ю — на 15 % меньше.

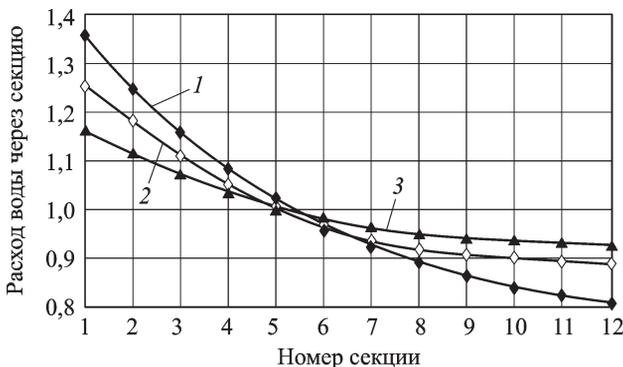


Рис. 8. Относительный расход воды через различные сечения при разных режимах работы моделей 1 и 2:

кривая 1 — модель 1, $Q = 20 \text{ см}^3/\text{с}$; кривая 2 — модель 1, $Q = 80 \text{ см}^3/\text{с}$; кривая 3 — модель 2, $Q = 20 \dots 80 \text{ см}^3/\text{с}$

В модели с гофрированными вставками неравномерность течения по параметру q ниже, причем она почти не зависит от общей подачи воды, и кривая 2 на рис. 8 соответствует расходам от 20 до $80 \text{ см}^3/\text{с}$. Относительный расход через первую сечение здесь приблизительно на 15 % больше среднего, а через 12-ю — на 7 % меньше.

Таким образом, неравномерность течения воды в модели 2 меньше примерно в 2 раза, чем в модели 1, а гидросопротивление в 1,5–2 раза больше.

Тот факт, что распределение течения по сечениям зависит от скорости прокачки воды в модели 1 и не зависит в модели 2, заслуживает отдельного рассмотрения.

Обозначим через R гидросопротивление межэлектродной полости сечения вместе с прорезями, через r — сопротивление части подводящего (отводящего) канала между двумя соседними сечениями. Тогда распределение относительных расходов по сечениям будет зависеть от отношения $R/r = x$. Если $x \rightarrow \infty$ ($R \gg r$), то расход через все межэлектродные полости сечений одинаков, если $x \rightarrow 0$ ($R \ll r$), тогда вся жидкость будет течь только по полости первой сечения. По результатам моделирования имеем: $x \approx 260$ в модели 1, $x \approx 540$ в модели 2.

Если гидросопротивления R и r линейно зависят от скорости жидкости (например, как гидросопротивление течению через прямолинейный канал при ламинарном режиме), тогда их отношение x остается постоянным. Это означает, что распределение относительных расходов по сечениям не зависит от скорости прокачки воды.

В нашем случае наличие местных сопротивлений вносит нелинейность в обеих моделях. Предположив, что зависимость R от скорости жидкости линейно-квадратичная, легко показать, что с увеличением скорости неравномерность расходов по сечениям уменьшается, кроме того, при увеличении R по сравнению с r зависимость распределения от скорости слабеет.

Выводы. Проведено численное моделирование течения воды в гидравлическом тракте электролизера с твердополимерным электроли-

том в условиях микрогравитации. Рассмотрены упрощенная модель строения электролизера (без гофроэлементов в межэлектродной полости) и модель, учитывающая их наличие. Получены данные о локальных характеристиках потока, которые могут служить основой для дальнейшего изучения процессов массопереноса с учетом образования газовой фазы при электролизе.. На основе выполненных расчетов можно сделать следующие общие выводы.

1. Общее гидросопротивление моделей при рабочих расходах невелико и на порядок меньше давления поверхностного натяжения в пузырьке диаметром 1 мм. Поэтому влияние капиллярных эффектов (прилипание пузырьков к стенкам) может проявляться значительно.

2. Гидросопротивление в модели с гофрированными вставками в 1,5–2 раза выше, чем в модели без них, а неравномерность расходов по секциям примерно в 2 раза ниже.

3. Пространственная структура течения внутри секции с гофрированными вставками определяется геометрией гофр в большей степени, чем скоростью прокачки воды.

4. Увеличение скорости воды (общего расхода) и повышение гидросопротивления межэлектродных полостей уменьшает неравномерность течения по различным секциям.

Теперь обратимся к вопросу о работоспособности электролизера при низких расходах подаваемой воды. Для устойчивости работы важна не равномерность течения по ширине секции, а равномерность распределения расходов воды по всем секциям. В случае если водородными пузырьками будет перекрыта часть проходного сечения какой-нибудь секции, то под действием капиллярных сил, как показывают эксперименты, вода может подводиться к мембране под “сухим пятном” внутри пористого титана. Если же будет перекрыта вся секция, то будет нарастать ее перегрев и работоспособность всего электролизера нарушится. С учетом этого необходимо стремиться к равномерному распределению воды по секциям, даже за счет увеличения неравномерности течения внутри секций. Используя эти соображения и опираясь на выводы, сделанные по результатам моделирования, можно сформулировать следующие рекомендации для улучшения работоспособности электролизера.

1. Увеличение расхода прокачиваемой воды.

2. Увеличение гидравлического сопротивления межэлектродного пространства полостей за счет уменьшения их проходного сечения, уменьшения шага профиля гофрированных вставок, а также уменьшения размеров прорезей.

3. Установка вместо шести гофрированных вставок с пазами одной сплошной (резко ухудшится равномерность течения внутри секций, но на работоспособности всей системы это может сказаться положительно).

4. Замена параллельного соединения межэлектродных полостей на последовательное (в предположении, что последнее изменение может

сохранить работоспособность электролизера даже при очень небольших расходах воды).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 08-08-13676-офи-ц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batchelor G. K. An introduction to fluid dynamics. – Cambridge, England: Cambridge Univ. Press, 1967.
2. Попов Д. Н., Панаиотти С. С., Рябинин М. В. Гидромеханика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

Статья поступила в редакцию 30.03.2009

Михаил Дмитриевич Диев (1949–2008) окончил в 1972 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области теплофизики двухфазных сред и интенсификации процессов теплообмена.

M.D. Diev (1949-2008) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. D. Sc. (Eng.), professor of “Thermal Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 70 publications in the field of thermal physics of two-phase media and intensification of heat exchange processes.

Дмитрий Николаевич Ильмов родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Инженер ФГУП “Центр Келдыша”. Автор 10 научных работ в области теплофизики.

D.N. Il'mov (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Engineer of Federal State Unitary Enterprise “Tsentr Keldysha”. Author of 10 publications in the field of thermal physics.

Александр Петрович Кубышкин родился в 1959 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1983 г. Канд. физ.-мат. наук, начальник отдела ФГУП “Центр Келдыша”. Автор более 60 научных работ в области теплофизики и физической химии.

A.P. Kubyshkin (b. 1959) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1983. Ph. D. (Phys.-Math.), head of department of Federal State Unitary Enterprise “Tsentr Keldysha”. Author of more than 60 publications in the field of thermal physics and physical chemistry.