

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ И СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЁ РАБОТЫ

Батчаев Адурхай Анзорович

Аспирант, Карачаево-Черкесский государственный
университет имени У.Д. Алиева, г. Карачаевск
adurkhai11@gmail.com

MODELING OF FLOWS IN THE CHANNEL OF AN ELECTROMEMBRANE SYSTEM AND A METHOD FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF ITS OPERATION

A. Batchaev

Summary. Freshwater shortage is becoming an increasingly pressing issue for many regions of the world. Seawater desalination using an electromembrane system is now recognized as the most promising solution. A spacer is used in the desalination channel to accelerate the deionization process. Channel flow simulations revealed that a vortex structure similar to a Karman Street forms in the wake of the spacer [1]. The presented paper continues that numerical study of the mentioned flow regime. The physical processes underlying the influence of a coherent vortex structure on the deionization of an aqueous solution in the channel are discussed. It is proposed a method for increasing the throughput of the electromembrane system.

Keywords: electromembrane system, spacer, flow simulation, vortex structures, lattice, turbulent flow.

Аннотация. Для многих регионов мира дефицит пресной воды становится всё более острой проблемой. В настоящее время признано, что наиболее перспективным решением этой задачи является обессоливание морской воды с помощью электромембранной системы. Для ускорения процесса деионизации в канале обессоливания используется спейсер. При моделировании течения в канале было обнаружено, что в следе за спейсером формируется вихревая структура типа дорожки Кармана [1]. В данной работе продолжено численное исследование подобного режима обтекания. Обсуждаются физические процессы, лежащие в основе влияния когерентной вихревой структуры на процесс деионизации водного раствора в канале. Предлагается способ, который позволит увеличить пропускную способность электромембранной системы.

Ключевые слова: электромембранная система, спейсер, моделирование обтекания, вихревые структуры, решетка, турбулентный поток.

Введение

Несмотря на то, что две третьих земной поверхности покрыто водой, дефицит пресной воды испытывает значительная часть населения по всему миру. Существует множество факторов, затрудняющих доступ к чистой воде даже там, где она имеется в достаточном количестве. Природные водные ресурсы Земли, такие как моря, океаны и подземные источники, содержат значительное количество растворённых солей, что делает их непригодными для прямого использования. Обессоливание морской воды рассматривается как основное решение устранения дефицита пресной воды [2]. Главной причиной необходимости обессоливания воды является рост населения. С увеличением его численности возрастает потребление воды как для питьевых нужд, так и для сельскохозяйственных и промышленных целей. В результате запасы пресной воды, особенно в засушливых и густонаселённых регионах, становятся всё более ограниченными.

Наиболее известным, традиционным методом обессоливания является дистилляция, при котором вода

нагревается до кипения, а затем пар конденсируется в отдельной ёмкости, оставляя за собой соли и другие примеси. Это надёжный способ удаления практически всех примесей, включая соли, бактерии и вирусы. Его недостатками являются высокие энергозатраты на нагрев воды и то, что сам процесс дистилляции медленный, что делает его менее подходящим для массового производства чистой воды.

Наиболее перспективным методом из ныне существующих признана электродеионизация [3]. Вода очищается путём воздействия электрического поля, которое перемещает ионы через ионообменные мембраны. Он обеспечивает высокую степень очистки воды и, самое главное, не имеет прямого ограничения в её производстве. Эффективность электрордеионизации зависит от гидродинамических параметров течения в канале. Одним из способов её повышения является применение парямоугольного спейсера, за которым может образоваться периодически изменяющаяся вихревая структура. Схема канала деионизации показана на фиг. 1 в работе [4].

Моделирование обтекания спейсера в канале обессоливания

Проведенное в работе [1] численное моделирование обтекания показало, что при достаточно большом значении Re в спутном следе за препятствием (спейсером), расположенным по центру канала, образуется периодически изменяющийся вихревая структура типа дорожки Кармана.

В случае, когда если расстояние до стенок велико по сравнению с поперечными размерами обтекаемого тела, картина двумерного течения за цилиндром и прямоугольной пластиной качественно одинаковы. Первичное ламинарное обтекание устойчиво при малых значениях числа Рейнольдса $Re = Ud / \nu$, где U — скорость натекающего потока, направленного, скажем, вдоль оси x , d — характерный размер обтекаемого тела вдоль оси y (например, диаметр цилиндра или толщина пластины) и ν — коэффициент кинематической вязкости. При переходе Re через первое критическое значение $Re_{1cr} \sim 1$, первичное течение сменяется вторичным стационарным режимом, при котором за цилиндром образуется пара симметрично расположенных вихрей. По мере увеличения Re вихри растут и, при переходе через второе критическое значение Re_{2cr} , начинается процесс их периодического, чередующегося отрыва. Вниз по течению амплитуда вихревого возмущения постепенно растет, что приводит к обрушению дорожки Кармана и формированию турбулентного следа.

Присутствие жестких границ приводит к существенному возрастанию величины Re_{2cr} и, более того, изменяет картину нестационарного режима обтекания. Течение за спейсером остается двумерным и поле скорости меняется по осям x и y . При его изучении в качестве характерного масштаба здесь вместо d следует выбрать расстояние между стенками канала l и, соответственно, теперь $Re = Ul / \nu$. На рис. 1 показана характерная для небольших значений Re/Re_{2cr} картина двумерного обтекания спейсера с размером $l/3$ в перпендикулярном к стенкам направлении — оси y . Амплитуда вихревого возмущения также растет по мере удаления от обтекаемого тела, но выходит на насыщение уже на расстоянии, сравнимом с длиной волны вихревого возмущения по направлению потока — оси x . Как видно из рисунка, размер возмущения в направлении оси y ограничена шириной канала. Отметим, что наблюдаемая вихревая структура типа дорожки Кармана на фоне среднего течения визуально выглядит как изменяющееся по пространству и по времени волнообразное течение.

В мембранных системах используется поперечная прямоугольная пластина, расположенная в центральной части канала. Под действием электрического поля

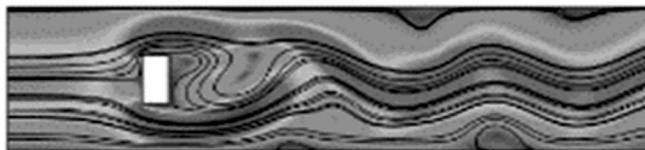


Рис. 1

ионы растворенной в воде поваренной соли, Na^+ и Cl^- движутся в противоположных направлениях. При этом концентрация ионов Na^+ будет минимальной у отрицательно заряженной стенки канала и максимальной у положительно заряженной, а концентрация ионов Cl^- будет симметрично противоположной. Вихревые потоки существенно повышают эффективное значение коэффициента диффузии. Скорость собственного перемещения ионов в электрическом поле не очень велико, поэтому, это будет способствовать более быстрому выравниванию концентрации ионов соли в канале. Напишем известную формулу, связывающую среднее перемещение взвешенной в жидкости частицы \bar{r} , коэффициента диффузии D и времени t :

$$\bar{r}^2 = Dt.$$

Таким образом, для заданного интервала времени при увеличении D величина \bar{r} растет по корневому закону. Следовательно, увеличение эффективного значения величины D ускоряет процесс деионизации раствора в канале обессоливания. Допустимое значение максимальной скорости потока \bar{v}_{max} , при котором достигается требуемая степень её очистки, ограничена и зависит от протяженности канала L . Подразумевается, что время перемещения ионов от одной стенки канала до другой не должно превышать L / \bar{v}_{max} . Ускорение деионизации раствора внутри канала дает возможность увеличить \bar{v}_{max} — т. е. пропускную способность электромембранной системы.

Помимо этого, вихревая структура изменяет профиль среднего по времени значения скорости. Параболический для стационарного режима профиль немного сглаживается в центральной части канала, а в пограничных слоях, наоборот, становится круче. Средние значения скорости в центральной части канала обессоливания возрастают, что приводит к дальнейшему увеличению его пропускной способности при заданном значении \bar{v}_{max} .

Способ повышения эффективности электромембранных систем

Из вышесказанного следует, что увеличение эффективного значения коэффициента диффузии означает повышение эффективности работы электромембранной

системы. Для дальнейшего увеличения пропускной способности канала обессоливания достаточно (при прочих равных значениях параметров установки) заменить спейсер на решетку, за которым вместо вихревой структуры, показанной на рис. 1, будет формироваться турбулентное течение. Начиная с пионерских работ по изучению свойств однородной турбулентности [5] и до настоящего времени, именно решетка использовалась для создания статистически стационарного, однородного турбулентного потока внутри длинного канала с поперечным сечением, имеющем форму квадрата. Исходя из геометрии канала обессоливания, вместо квадратной решетки следует использовать вместо одного систему спейсеров, расположенных в начале канала на равном расстоянии друг от друга — своего рода «интерференционной» решетки, за которым даже при относительно небольших значениях U будет формироваться турбулентный поток. Из сказанного в предыдущем пункте следует, что дополнительное увеличение пропускной способности канала обессоливания будет достигнуто, во-первых ввиду того, что коэффициент турбулентной диффузии почти в 100 раз выше молекулярной и превышает эффективное значение, соответствующее когерентной вихревой структуре. Во-вторых, в турбулентном течении профиль средней скорости практически полностью выравнивается в центральной области канала, площадь которой в данном случае больше.

Заключение

В работе обсуждаются известные способы решения проблемы дефицита пресной воды, актуальный во

многих регионах мира. Рассматривается её наиболее перспективное решение — метод электродеионизации с применением спейсера, расположенного посередине канала обессоливания.

В представленной работе проведено численное моделирование обтекания спейсера в узком канале. Получено, что при переходе числа Рейнольдса через Re_{2cr} в канале обессоливания формируется периодически изменяющаяся вихревая структура типа дорожки Кармана. Отмечены два физических процесса, способные увеличить пропускную способность канала обессоливания — увеличение коэффициента диффузии и выравнивание профиля средней скорости в центральной области канала. Первый из них ускоряет процесс деионизации раствора и позволяет увеличить \bar{v}_{max} , а второй — увеличивает при данном значении \bar{v}_{max} массоперенос через канал.

Предложен способ, дополнительно повышающий эффективность работы электромембранных систем — замена спейсера на решетку. Тогда вместо вихревой структуры типа дорожки Кармана в канале будет формироваться турбулентный поток. Это ещё больше ускорит процесс деионизации раствора и в большей степени выровняет профиль средней скорости течения в канале обессоливания, что приведет к дополнительному увеличению пропускной способности электромембранной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батчаев А.А. О динамике вихревой дорожки кармана в узком канале. Алиевские чтения. Материалы научной сессии преподавателей, научных работников и аспирантов КЧГУ, посвящённой Году педагога и наставника. Карачаевск, 2023
2. Jones E., Qadir M., van Vliet M.T., Smakhtin V., Kang S.M. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ.* 2019, 657, 1343–1356.
3. Doornbusch G., van der Wal M., Tedesco M., Post J., Nijmeijer K., Borneman Z. Multistage electrodialysis for desalination of natural seawater. *Desalination* 2021, 505, 114973.
4. Aminat Uzdenova, Anna Kovalenko, Evgeniy Prosviryakov, Makhamet Urtenov. Mathematical Modeling of the Influence of the Karman Vortex Street on Mass Transfer in Electromembrane Systems. *Membranes* 2023, 13, 394.
5. G.I. Taylor. Statistical theory of turbulence. (1935) *Proc. R. Soc. London. Ser. A.* 151, 421.

© Батчаев Адурхай Анзорович (adurkhai11@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»