

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОФЛЮИДНОГО КЛАПАНА ТЕСЛЫ

Аннотация. В работе рассмотрен микрофлюидный клапан Теслы, состоящий из четырех ступеней. Численно исследован стационарный режим течения несжимаемой линейно-вязкой жидкости в прямом и обратном направлениях. Исследовано влияние угла наклона отводящего канала на эффективность запираания потока. Получена зависимость диодности устройства от угла наклона отводящего канала. Рассмотрен вопрос сеточной сходимости решения. Выбраны оптимальные параметры расчетной сетки.

Ключевые слова: клапан Теслы, гидравлический диод, вычислительная гидродинамика, микрофлюидика, OpenFoam, SALOME, NETGEN.

Введение. Характерной особенностью гидравлических диодов, к которым относится клапан Тесла [1], является то, что флюид, проходящий через него в одном направлении, разделяется на потоки, которые направляются таким образом, что обеспечивается взаимное гашение их кинетической энергии, в результате чего обеспечивается значительное возрастание активного сопротивления клапана в этом направлении.

Достоинством подобных устройств является их простота. Они не имеют подвижных частей, надежны, долговечны и легко масштабируются. Поэтому они нашли применение в качестве устройств гашения скачков давления [2], микрофлюидных миксеров [3] и как составные части микрофлюидных насосов [4–6]. Поскольку увеличение гидравлического сопротивления в клапане происходит за счет гашения кинетической энергии встречных потоков, то имеет смысл использовать гидравлические диоды в качестве декомпрессоров для водородного топлива [7]. В случае же микроканальных теплообменников подобной конструкции [8] цель состоит в том, чтобы свести к минимуму перепад давления и максимизировать конвективную теплопередачу.

Проблема исследования. В настоящее время существует множество различных вариаций клапана Теслы, заметно отличающихся от оригинальной версии, представленной в патенте US1329559А Николы Теслы. В нашем случае исследуемая геометрия диода (рис. 1б) состояла из четырех ступеней (рис. 1а), сопряженных между собой, входного и выходного участков квадратного сечения со стороной $w = 500$ мкм. Длины входного и выходного участков принимались равными десятикратной ширине канала во всех случаях. Оптимизируемым параметром был выбран угол наклона α отводящего канала (рис. 1а).

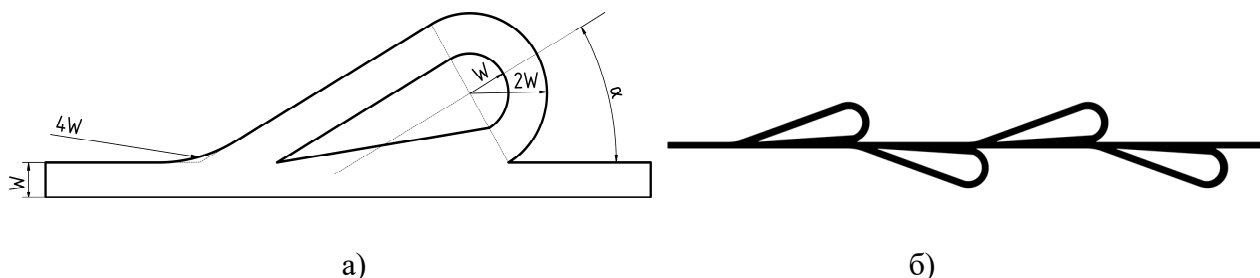


Рис. 1. Схема одной ступени (а) и исследуемый гидравлический диод в случае угла $\alpha = 20^\circ$ (б)

Материалы и методы. Для оценки эффективности работы диода рассчитывался параметр диодности при постоянном объемном расходе Q

$$Di = \left(\frac{\Delta p_r}{\Delta p_f} \right)_Q \quad (1)$$

где Δp_r и Δp_f — перепад давления при обратном и прямом направлении потока соответственно, которые находились в результате численного решения стационарных уравнений Навье-Стокса

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} & \mathbf{x} \in \Omega \\ \mathbf{u} = 0 \\ \nabla p = 0 & \mathbf{x} \in \partial\Omega_{wall} \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{S} = Q \\ \nabla p = 0 & \mathbf{x} \in \partial\Omega_{in} \\ \nabla \mathbf{u} = 0 \\ p = p_0 - \frac{\rho \mathbf{u}^2}{2} & \mathbf{x} \in \partial\Omega_{out} \end{cases} \quad (2)$$

где $\mathbf{u}$ — вектор скорости, p — давление, p_0 — полное давление на выходе из клапана. Кинематическая вязкость ν принималась равной 10^{-6} м²/с. Объемный расход $Q = 3.75 \cdot 10^{-7}$ м³/с, что соответствовало средней скорости на входе в клапан $|\mathbf{u}| = 3$ м/с и числу Рейнольдса $Re = \frac{|\mathbf{u}|w}{\nu} = 1500$.

Хотя режим течения при таком числе Рейнольдса нельзя однозначно считать турбулентным, процедура численного решения значительно упрощается с использованием модели турбулентности. В качестве последней была выбрана модель турбулентности $k - \varepsilon$ (ссылка) как наиболее универсальная

$$\nabla \cdot \rho k \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \rho \varepsilon \mathbf{u} = \nabla \cdot (\rho D_\varepsilon \nabla \varepsilon) + \frac{C_1 \varepsilon}{k} (P + \frac{2}{3} C_3 k \nabla \cdot \mathbf{u}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

где k — турбулентная кинетическая энергия, D_k — эффективная диффузионная способность для k , P — скорость производства турбулентной кинетической энергии, ε — скорость рассеивания турбулентной кинетической энергии, D_ε — эффективная диффузионная способность для ε , ν_t — турбулентная вязкость, C_1 , C_2 , C_3 , C_μ — модельные коэффициенты.

Построение геометрии и сетки выполнялось с помощью текстового Python-интерфейса открытого программного комплекса SALOME [9]. Автоматическое построение сетки выполнялось с помощью открытого сеточного генератора NETGEN [10] посредством задания минимального и максимального размера ячеек.

Расчеты проводились на неструктурированной тетраэдрической сетке с призматическим подслоем вблизи стенок. Сетка имела увеличенную плотность сеточных элементов вблизи особенностей геометрии клапана (рис. 2а). Поскольку геометрия расчетной области имеет одну плоскость симметрии расчетная сетка строилась только для половины области течения (рис. 2б) что позволило сэкономить вычислительные ресурсы.

Численное решение системы (2) — (5) выполнялось с помощью решателя simpleFoam, являющегося стандартным решателем OpenFoam [11]. Связь полей давления и скорости в данном решателе реализована посредством алгоритма SIMPLE.

Для исследования сеточной сходимости изменялся максимальный характерный размер ячейки, при сохранении отношения между минимальным и максимальным размером ячеек для данной сетки.

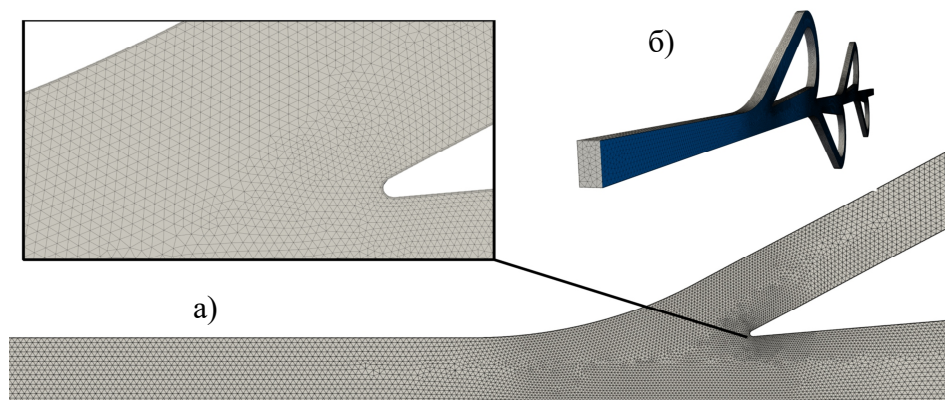


Рис. 2. Расчетная сетка. Зоны с увеличенной сеточной плотностью (а), половина области течения (б) (плоскость симметрии выделена синим цветом)

Результаты. На первом этапе была исследована сеточная сходимость численного решения для случая угла $\alpha = 30^\circ$. Для этого была проведена серия расчетов с различным сеточным разрешением, причем изменялся максимальный характерный размер ячейки, при сохранении отношения между минимальным и максимальным размером ячеек для данной сетки, которое принималось равным 0.25. Для оценки сходимости рассчитывалась диодность (1). На рис. 3а приведена зависимость диодности клапана от количества контрольных объемов в сетке. Можно видеть, что резкий скачок диодности, после которого дальнейшее увеличение разрешения сетки не приводит к значительному изменению, происходит при 5–6 миллионах элементов. Причем, среднее изменение диодности для сеток с разрешением менее 5 миллионов элементов составляет 1,75%, в то время как для сеток с большим разрешением изменение составляет уже 0,99%. В целом же изменение диодности составляет более 5% в диапазоне сеток от 0.7 до 28.8 миллионов.

Как видно из графика рис. 3б уменьшение максимального размера элемента менее 40 мкм не приводит к значительному изменению диодности (1), поэтому можно считать данный размер ячеек вычислительной сетки приемлемым для последующей параметрической оптимизации клапана Теслы, предложенной конструкции (рис. 1).

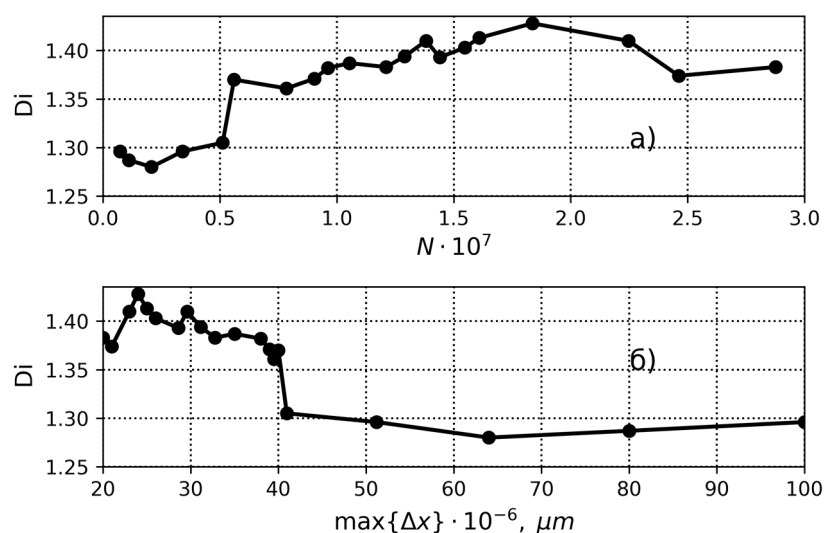


Рис. 3. Зависимость диодности от количества контрольных объемов в сетке (а) и максимального размера ячейки сетки (б) для случая $\alpha = 30^\circ$

Принцип работы клапана можно объяснить на примере полученных полей давления и скорости (рис. 4) для случая $\alpha = 30^\circ$. При обратном подключении (рис. 4а) видно, как по мере удаления от входа, давление в клапане снижается почти линейно. Далее в местах, где поток разделяется и смешивается, происходит резкое падение давления и скорости вследствие встречи двух разнонаправленных потоков. В ядре потока падение скорости достигает 40%.

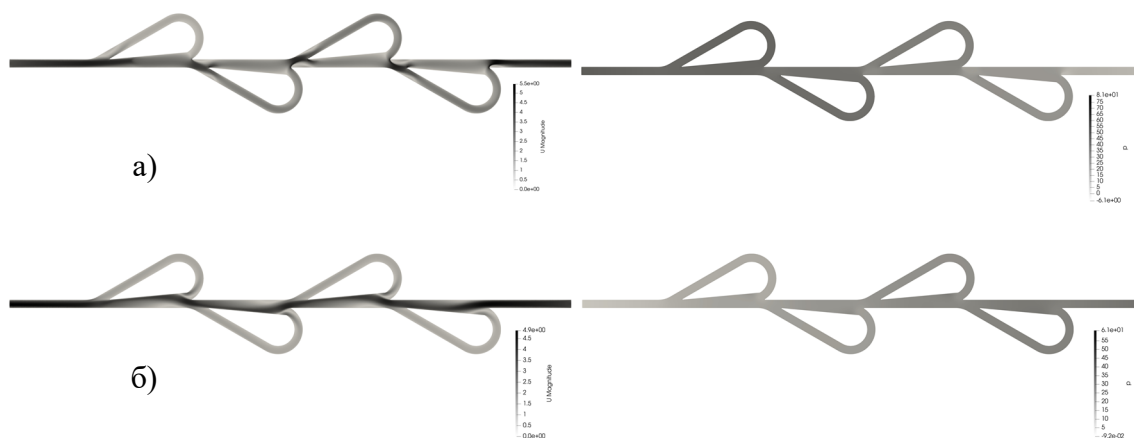


Рис. 4. Поля скорости и давления при обратном (а) и прямом (б) подключениях для случая $\alpha = 30^\circ$

В отличие от обратного подключения прямое (рис. 4б) демонстрирует почти линейное падение давления на всей длине центрального канала. Поток образует высокоскоростное ядро незначительно нарушая свою структуру в местах геометрического расширения канала. Потерь кинетической энергии в следствие встречи разнонаправленных потоков не происходит.

На втором этапе, после определения оптимального сеточного разрешения, было проведено параметрическое исследование, при котором угол α менялся в диапазоне от 10° до 70° (рис. 5). В результате параметрического исследования было установлено, что предложенная конфигурация клапана Теслы имеет максимальную диодность $D_i = 1.431$ при $\alpha = 17.5^\circ$.

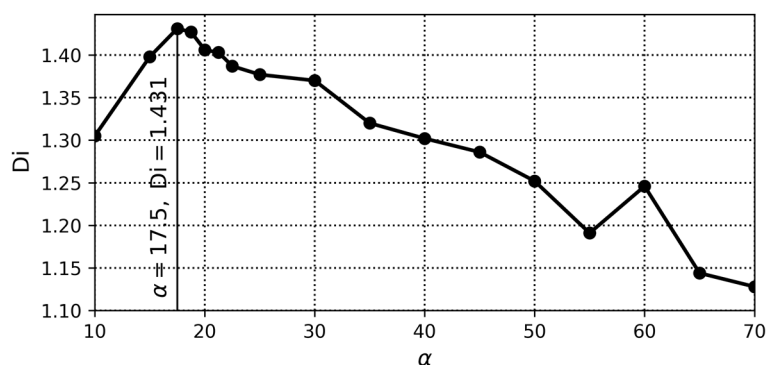


Рис. 5. Зависимость диодности от угла α

Заключение. Был написан модуль на языке Python посредством SALOME API для построения параметрической геометрии и вычислительной сетки.

Исследована сеточная сходимость решения. Определены оптимальная плотность и размер сетки, что позволило сэкономить вычислительные ресурсы.

При параметрическом исследовании гидродинамического диода предложенной конструкции определен оптимальный угол отводящих каналов $\alpha = 17.5^\circ$, при котором достигается максимальная диодность $D_i = 1.431$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Purwidyantri, Agnes and Prabowo, Briliant. (2023). Tesla Valve Microfluidics: The Rise of Forgotten Technology. Chemosensors. 11. 256. 10.3390/chemosensors11040256.
2. Xueguan Song, Lei Cui, Maosen Cao, Wenping Cao, Youngchul Park, William M. Dempster. A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel. Energy Conversion and Management. — 2014. — Vol. 81. — P. 407-419. 10.1016/j.enconman.2014.02.021.
3. Jiangtao Li, Baojian Ma, Xiangyu Zhang, Qunxi Zhao, Runze Sun, Jiachen Zhao. Design and optimization of Tesla micromixer with asymmetrical arrangement for efficient mixing in microfluidic chip. Chemical Engineering and Processing — Process Intensification. — 2025. — Vol. 209. 10.1016/j.cep.2025.110181.
4. Gamboa, A. R., Morris, C. J., and Forster, F. K. (2003). Optimization of the Fixed-Geometry Valve for Increased Micropump Performance. Fluids Engineering. 10.1115/imece2003-55036.
5. Morganti, Elisa and Pignatelli, Giorgio. (2005). Microfluidics for the treatment of the hydrocephalus. Proc. 1st Int. Conf. on Sensing Technology.
6. Forster, Fred and Williams, Brian. (2002). Parametric Design of Fixed-Geometry Microvalves: The Tesser Valve. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings. 10.1115/IMECE2002-33628.
7. Zhi-jiang Jin, Zhi-xin Gao, Min-rui Chen, Jin-yuan Qian. Parametric study on Tesla valve with reverse flow for hydrogen decompression. International Journal of Hydrogen Energy. — 2018. — Vol. 43. — Iss. 18. 10.1016/j.ijhydene.2018.03.014.
8. Gang Du, Theyab R. Alsenani, Jitendra Kumar, Salem Alkhalaf, Tamim Alkhalifah, Fahad Alturise, Hamad Almujaibah, Sami Znaidia, Ahmed Deifalla. Improving thermal and hydraulic performances through artificial neural networks: An optimization approach for Tesla valve geometrical parameters. Case Studies in Thermal Engineering. — 2023. — Vol. 52. 10.1016/j.csite.2023.103670.
9. Платформа Salome; сайт. — URL: <https://www.salome-platform.org> (дата обращения: 25.04.2025).
10. Высокопроизводительное мультифизичное конечно-элементное программное обеспечение; сайт. — URL: <https://ngsolve.org> (дата обращения: 25.04.2025).
11. Моделирование гидродинамических процессов в программном комплексе OpenFOAM; сайт. — URL: <https://openfoam.org> (дата обращения: 25.04.2025).