

## Аннотация

В данной работе рассматривалась оригинальная конструкция гидродинамического диода в котором основным исследуемым параметром был выбран угол наклона отводящего канала. Численно исследован стационарный режим течения несжимаемой линейно-вязкой жидкости. Получена зависимость диодности устройства от угла наклона отводящего канала. Рассмотрен вопрос сеточной сходимости решения. Выбраны оптимальные параметры расчетной сетки.

## Введение.

Характерной особенностью гидродинамических диодов, так же известных как клапаны Тесла [1], является то, что при заданном расходе флюида необходимо прикладывать разный перепад давления в зависимости от направления потока. Такое воздействие на флюид является результатом построения каналов по определенному шаблону, что позволяет генерировать сложные схемы течения при обратном подключении, когда перепад давления наибольший, и более плавные схемы при прямом подключении, когда перепад наименьший. Данные устройства нашли широкое применение в науке и технике поскольку сочетают в себе простоту конструкции за счет отсутствия механических подвижных частей и эффективность. Клапаны такого типа обладают такими преимуществами как масштабируемость, долговечность и простота изготовления из различных материалов.

В статье [2] было проведено численное исследование работы клапана Теслы в качестве декомпрессора для водородного топлива при заправке электромобиля. Скорость, с которой сжатый водород выходит слишком высокая и повреждает топливную систему, однако, Клапан Тесла способен замедлить ток флюида поступающего в автомобиль. Анализируется распределение давления в клапане при различных скоростях. Высокий перепад давления достигается при малом гидравлическом диаметре, большом угле наклона и малом внутреннем радиусе отводного канала.

В работе [3] представлена оригинальная конфигурация клапана Теслы со встроенным миксером. Также продемонстрирована модель прогнозирования и оптимизации тепловых и гидравлических характеристик гидродинамического диода. Исследователи изучают влияние внутреннего радиуса отводящего канала, длины U-образного сегмента и угла наклона отводящего канала на число Нуссельта и перепад давления.

В данной работе [4] было исследовано применение микрофлюидных устройств в медицине. Был представлен панорамный обзор технологий и материалов, которые могут быть использованы для лечения Гидроцефалии. Представлена наиболее подходящая комбинация материалов, технологий и конструкций для получения полностью имплантируемого микронасоса.

В статье [5] проводился анализ предохранительного клапана прямого действия, установленного на сосуде высокого давления. Была разработана численная модель для исследования текущих и динамических характеристик клапана. Работа клапана моделируется с использованием трехмерной подвижной сетки.

В работе [6] рассматривался клапанный микронасос с фиксированной геометрией. Был предоставлен процесс для оптимизации формы клапана с использованием вычислительной гидродинамики в двумерной постановке в сочетании с алгоритмом оптимизации. Диодность клапана была улучшена за счет манипулирования шестью безразмерными, независимыми геометрическими параметрами клапана Теслы.

В исследовании [7] представлено параметрическое описание двух типов клапанов с фиксированной геометрией, сопло-диффузор и клапан Тесла. Был создан новый тип клапана – клапан Тессер, обладающий характеристиками как клапана Теслы, так и сопла-диффузора. Были проведены расчеты полученного клапана в двумерной постановке.

## Геометрия расчетной области и расчетная сетка

В настоящее время существует множество различных вариаций клапана Теслы, заметно отличающихся от оригинальной версии, представленной в патенте US1329559A самим Николо Тесла. В нашем исследовании используется следующая параметризованная модель геометрии клапана Теслы:

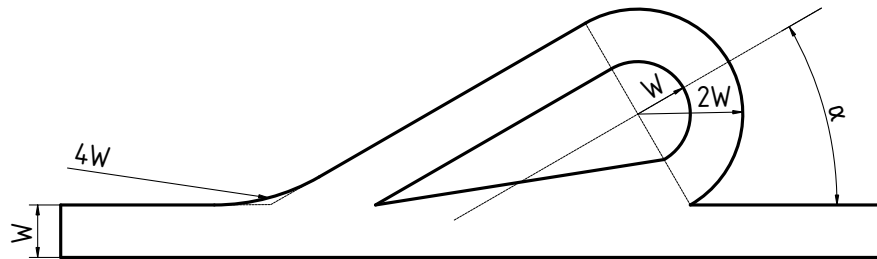


Рис. 1: Клапан Тесла.

Это прямой канал с U-образным отводным каналом. Задача отводного канала, разделить ток жидкости идущей по основному каналу, и перенаправить отведенную часть против основного потока. Таким образом, клапан Тесла, при обратном подключении и работает, замедляя ток жидкости. Заметным отличием от оригинальной версии клапана Теслы является явно выделенный основной канал, к которому добавлены отводящие каналы.

На основе выбранного шаблона был написан скрипт на языке Python, для построения параметрической геометрии и расчетной сетки с минимальным количеством независимых параметров. На рис. 1 схематично показана зависимость геометрии клапана от вводимых параметров, всего независимых параметров два - это ширина канала,  $W$ , и угол наклона отводящего канала,  $\alpha$ . Скругление на входе в отводящий канал влияет на эффективность клапана, увеличивая площадь входа в U - образный канал. Основным параметр для параметрического исследования – это угол  $\alpha$ , а для исследования сеточной сходимости – это максимальный характерный размер одной ячейки сетки, в микрометрах, при сохранении отношения между минимальным и максимальным размером ячеек.

На рис. 2 угол  $\alpha$  равен 30 градусам, ширина канала была выбрана равной 500 мкм или 0.0005 м. Также, можно видеть, что сетка не однородная. В нашей задаче основной интерес сосредоточен в областях, где поток разделяется и перемешивается. В них могут происходить отрывы или скачки, для разрешения градиентов давления и более точного определения профиля скорости разрешение сетки в этих областях выше.



Рис. 2: Расчетная сетка.

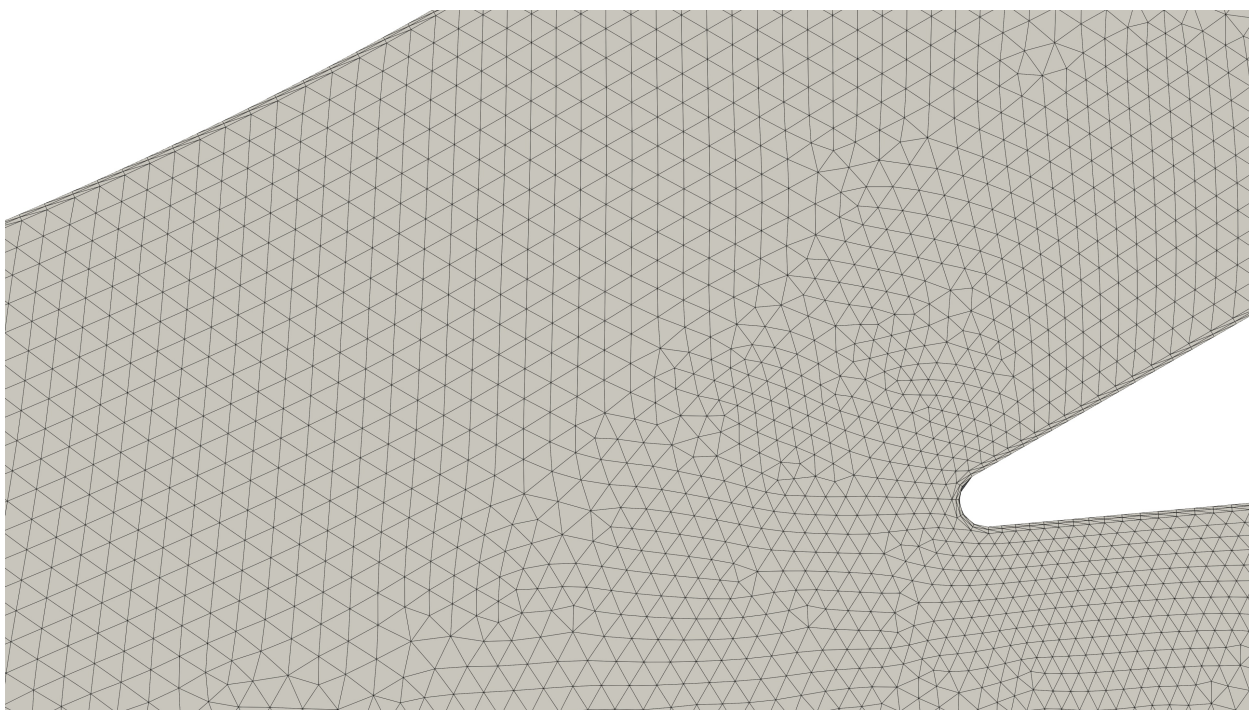


Рис. 3: Расчетная сетка в приближении.

Для разрешения градиента скорости вблизи стенок был добавлен сеточный подслой (рис. 3). Скругления острых углов сделано с целью построения более качественной сетки, радиус скругления фиксирован.

## Режим течения и расчет.

Чтобы определить какого рода перед нами течение, можно рассчитать число Рейнольдса,  $Re$ . Исходя из полученного значения, можно будет сделать выводы о характере потока, турбулентное или

ламинарное. Так как канал нашей конфигурации клапана Теслы имеет квадратное сечение, то формула для определения числа Рейнольдса имеет вид:

$$Re = \frac{uD_H}{\nu}, \quad (1)$$

где  $u$  - скорость в канале, м/с,  $D_H = \frac{4A}{P}$  - гидравлический диаметр, м,  $\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с. где  $A$  - площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>,  $P$  - смоченный периметр.

Для нашей конфигурации была выбрана скорость, задаваемая на входе, равной 3 м/с, а число соответственно равно Рейнольдса - 1500.

OpenFoam - это открытый программный комплекс для решения задач механики сплошной среды. SimpleFoam - это стационарный решатель для несжимаемого турбулентного потока, использующий алгоритм SIMPLE. Математическая модель, реализованная в решателе SimpleFoam, имеет вид:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

Где  $\mathbf{u}$  - скорость, м/с,  $p$  - кинематическое давление, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>,  $\boldsymbol{\tau}$  - тензор напряжения. Каждый цикл итерации влечет за собой сначала расчет промежуточного поля скорости, которое удовлетворяет линеаризованным уравнениям импульса для предполагаемого распределения давления: затем применяется принцип сохранения массы для настройки скоростей и давлений, так что все уравнения находятся в равновесии.

Выбранным типом моделирования турбулентности был параметр RAS. Модель k-epsilon объединяет уравнения турбулентной кинетической энергии (4),  $k$ , и уравнение скорости рассеивания турбулентной кинетической энергии (5),  $\epsilon$ .

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \epsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\epsilon \nabla \epsilon) + \frac{C_1 \epsilon}{k} (P + C_3 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u}) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Где  $k$  — турбулентная кинетическая энергия, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>,  $D_k$  - Эффективная диффузионная способность для  $k$ ,  $P$  - скорость производства турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>-3</sup>,  $\epsilon$  - скорость рассеивания турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>-3</sup>,  $D_\epsilon$  - Эффективная диффузионная способность для  $\epsilon$ .

Далее решается уравнение для турбулентной вязкости:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Где  $C_\mu$  - модельный коэффициент турбулентной вязкости,  $\mu_t$  - турбулентная вязкость, м<sup>2</sup>/с<sup>-1</sup>.

Граничные условия для решения уравнений турбулентности заданы через интенсивность для  $k$  (7) и через длину перемешивания для  $\epsilon$  (8). Граничные условия для скорости заданы через объемный расход, для давления через абсолютное давление (9).

$$k_p = 1.5(I|U|)^2 \quad (7)$$

Где  $k_p$  - кинетическая энергия на границе, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>,  $I$  - интенсивность турбулентности.

$$\epsilon_p = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{L} \quad (8)$$

Где  $\epsilon_p$  - диссипация кинетической энергии на границе, м<sup>2</sup>/с<sup>-3</sup>,  $L$  - шкала длины.

$$p_p = p_0 + \frac{1}{2} |u_0|^2 - \frac{1}{2} |u|^2 \quad (9)$$

Где  $p_p$  - давление на границе,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ,  $p_0$  - внешнее статическое давление,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ,  $u$  - скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $u_0$  - внешняя скорость,  $\text{м}/\text{с}$ .

Оценить эффективность клапана Теслы, после получения результатов расчета, мы можем, посчитав его диодность,  $Di$  (10). Если  $Di > 1$ , то рассматриваемый клапан можно считать рабочим. Для этого мы проводили расчет нашей конфигурации клапана Тесла с одинаковыми параметрами дважды, но при разных подключениях: при обратном, когда перепад давления наибольший, и, при прямом, когда перепад давления наименьший. Полученные данные фиксировались.

$$Di = \left( \frac{\Delta p_r}{\Delta p_f} \right)_Q \quad (10)$$

Где  $\Delta p_r$  - перепад давления при обратном подключении,  $\Delta p_f$  - перепад давления при прямом подключении для скорости потока  $Q$ .

## Результаты.

При выборе минимального разрешения сетки, мы остановились на таком разрешении, которое позволяло бы на входе поместиться 5 ребрам ячеек расчетной сетки (рис. 4). Такое решение было принято в пользу лучшей сходимости задачи.

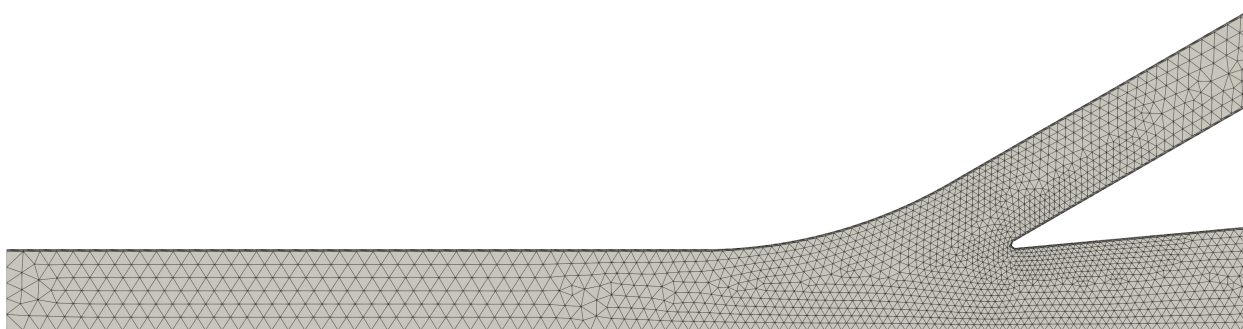


Рис. 4: Минимальное разрешение сетки.

Рассмотрим полученные в ходе расчетов поля давления (рис. 5) и скорости (рис. 6) при обратном подключении. На изображении поля давления видно, как по мере удаления от входа, давление в клапане снижается и имеет вид приближенный к линейному. Видно, как в местах где поток разделяется и смешивается, происходят скачки давления. Изображение поля скорости, демонстрирует нам значительное падение скорости между участками клапана, где происходит разделение и смешивание потоков жидкости.

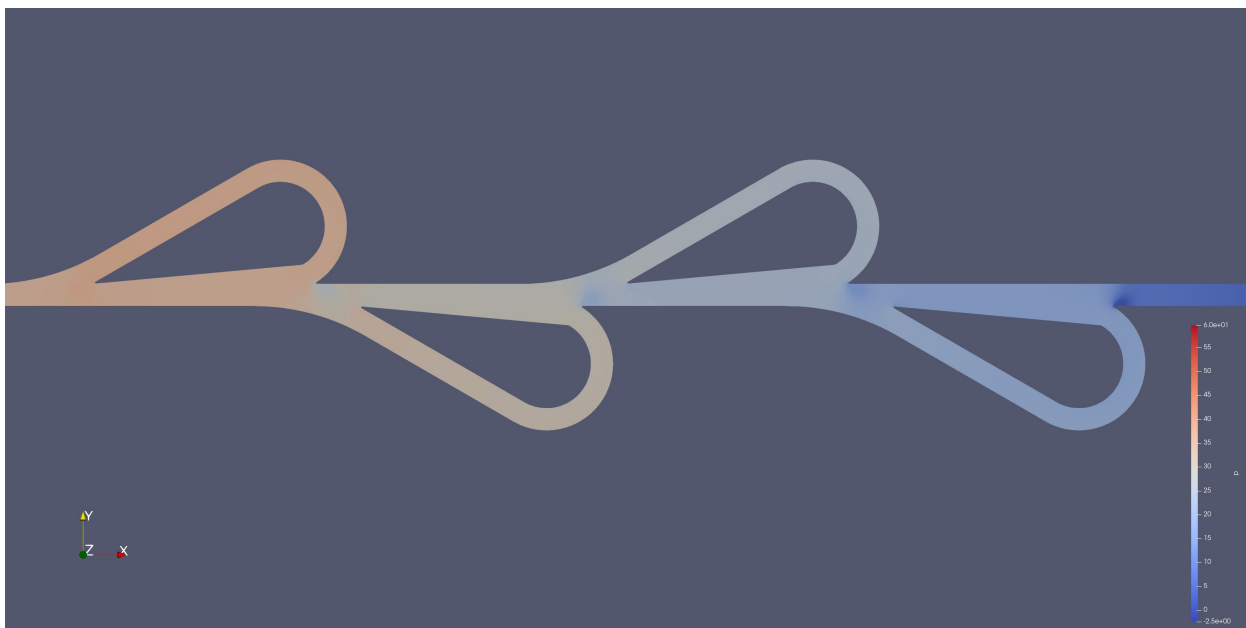


Рис. 5: Поле давление при обратном подключении.

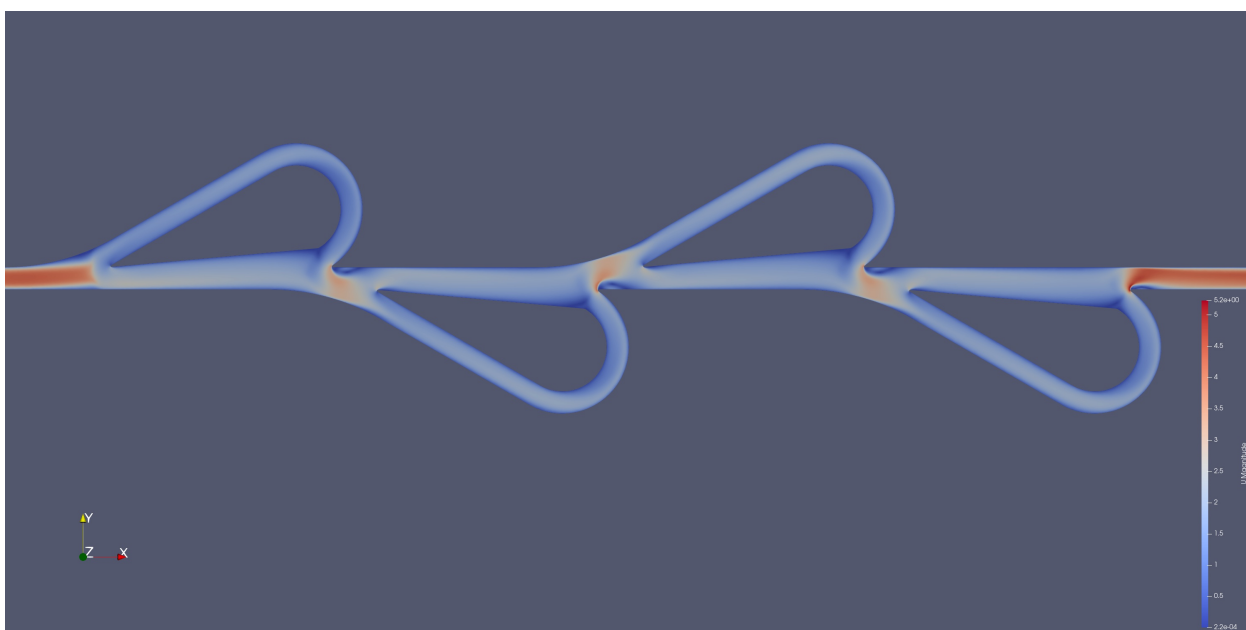


Рис. 6: После скорости при обратном подключении.

Ход исследования сеточной сходимости. Было принято решение отталкиваться максимального размера ячейки. Каждая следующая сетка отличалась от предыдущей тем, что заданный максимальный размер ячейки отличался на 20 процентов. Таким образом мы получаем следующую таблицу:

График зависимости диодности клапана Тесла от разрешения сетки, где мерой разрешения является количество элементов сетки, имеет вид:

Таблица 1: Результаты исследования сеточной сходимости.

№	Максимальный размер ячейки, мкм	Кол-во элементов сетки	$Di$
1	100	728 607	1,213
2	80	1 106 796	1,204
3	64	2 072 292	1,197
4	51,2	3 395 988	1,213
5	40,96	5 116 005	1,222
6	32,768	12 107 251	1,262

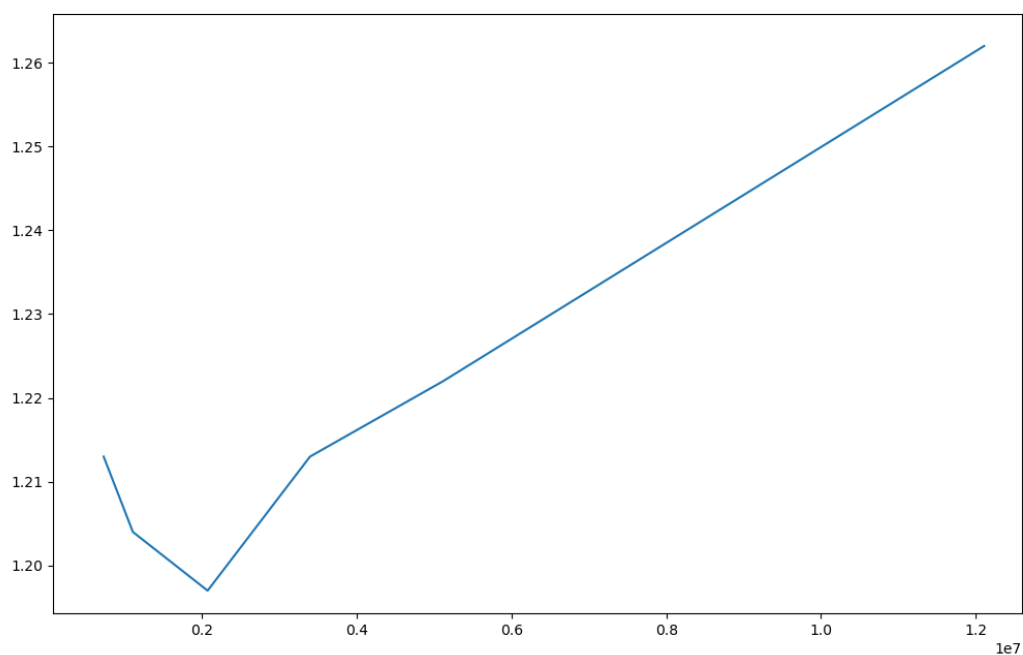


Рис. 7: Зависимость диодности от разрешения сетки.

По графику (рис. 7) можно видеть, что с увеличением количества элементов сетки растет и диодность. Для того, чтобы сделать вывод о сеточной сходимости, нам надо добавить точек и выяснить, после какого разрешения диодность перестанет расти и начнет колебаться. Таблица с дополнительными точками будет иметь вид:

Таблица 2: Результаты исследования сеточной сходимости с доп. точками.

№	Максимальный размер ячейки, мкм	Кол-во элементов сетки	$Di$
1	100	728 607	1,213
2	80	1 106 796	1,204
3	64	2 072 292	1,197
4	51,2	3 395 988	1,213
5	40,96	5 116 005	1,222
6	40	5 602 384	1,287
7	39,5	7 844 962	1,278
8	39	9 039 949	1,288
9	38	9 620 454	1,299
10	35	10 540 924	1,304
11	32,768	12 107 251	1,262
12	31,1296	12 896 528	1,311
13	29,6	13 815 303	1,327
14	28,6	14 401 893	1,310
15	26	15 471 471	1,320
16	25	16 085 501	1,330
17	24	18 362 556	1,345
18	23	22 476 068	1,327
19	21	24 620 942	1,291
20	19	28 765 237	1,3

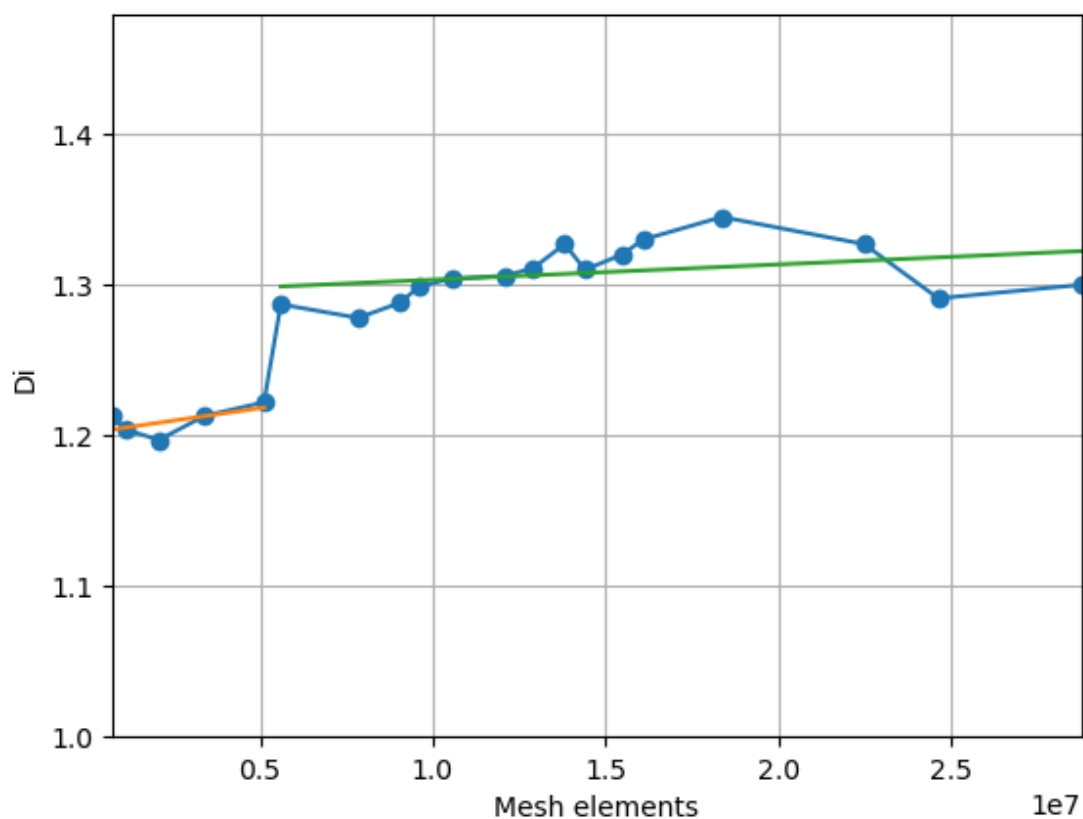


Рис. 8: Линии тренда для зависимости диодности от количества элементов

По представленным на графике (рис. 8) данным можно видеть, как с последующем увеличе-



нием разрешения сетки, диодность резко возрастает, однако, в последствии, рост диодности заметно замедляется. Исходя из этого, можно сделать вывод о сеточной сходимости. Достигая определенной плотности сетки, дальнейшее увеличение количества элементов не приведет к значительному улучшению решения, но потребует дополнительных вычислительных ресурсов. Добавленные линии тренда позволяют нам увидеть, что сетки до 5 млн элементов имеют рост диодности выше, чем сетки с более высокой плотностью, но среднее значение диодности у них меньше. Средний рост диодности для сеток с разрешением менее 5 миллионов элементов составляет 1,75 %, в то время как для сеток с большим разрешением средний рост диодности составляет уже 0,99 %. Если взять максимальное разрешение сетки за эталонное, то есть максимально приближенное к правильному решению, и посчитать во сколько процентов отличаются решения с меньшим разрешением, то результаты, полученные на сетках с разрешением менее 5 млн. элементов отличаются в более чем на 5 %. Для дальнейшего параметрического исследования, нам следует выбрать сетку, плотность которой можно считать оптимальной. Для этого построим график зависимости диодности от максимального размера ячейки сетки.

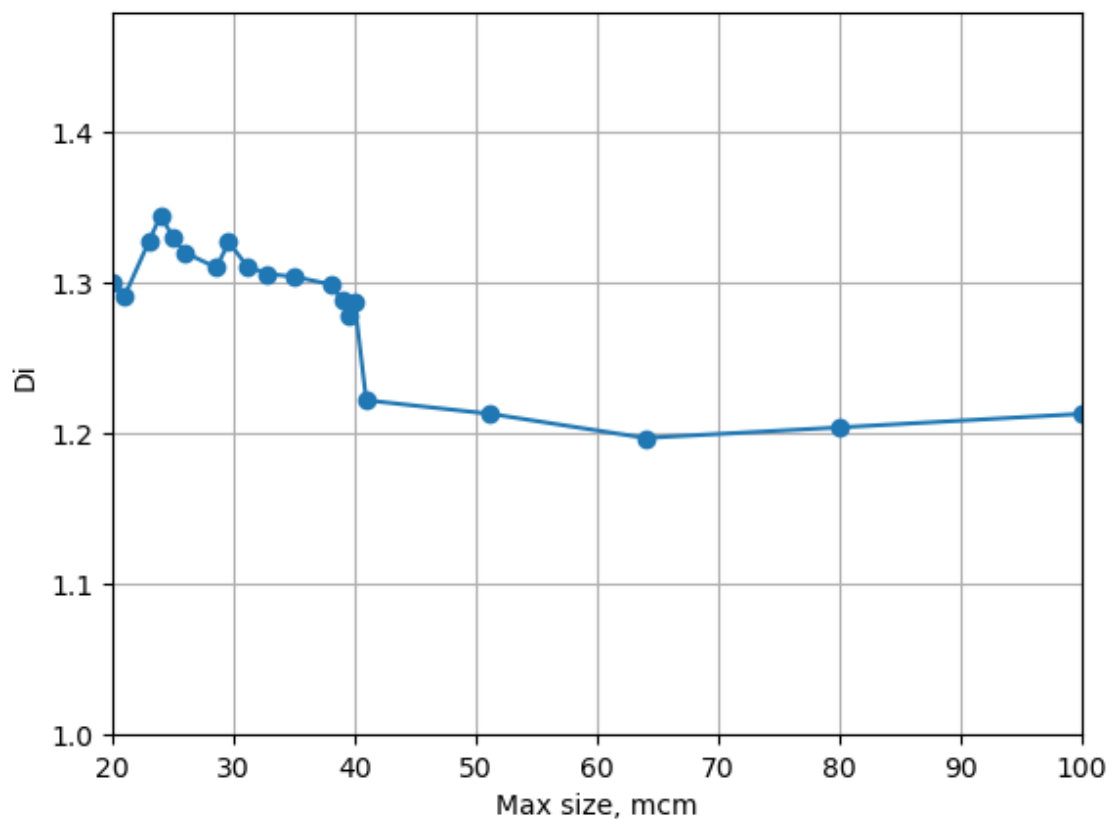


Рис. 9: Зависимость диодности от максимального размера ячейки

Из графика (рис. 9) можно сделать вывод о том, что значительный прирост диодности происходит при максимальном характерном размере ячейки сетки равным 40 мкм. Этот размер мы и будем использовать при параметрическом исследовании. Что позволит нам получать более точные результаты оптимально задействовав вычислительные мощности.

Параметрическое исследование клапана Теслы. Мы провели ряд расчетов, используя оптимальную сетку определенную в ходе исследования сеточной сходимости. В этих расчетах мы изменяли угол  $\alpha$  (рис. 1), определяя угол при котором диодность будет максимальной. Минимальное значение для угла  $\alpha$  равно 10 градусам, а максимальное 70 градусам. В ходе исследования, шаг для угла был взять равным 5 градусам. В месте, с предполагаемым пиком диодности, 20 градусов, шаг был равным

1,25 градуса.

ВСТАВИТЬ ФОТО ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕДИНИТЬ ФОТО В ОДНО

В результате параметрического исследования мы получаем следующий график (рис. 10) зависимости диодности от угла  $\alpha$ .

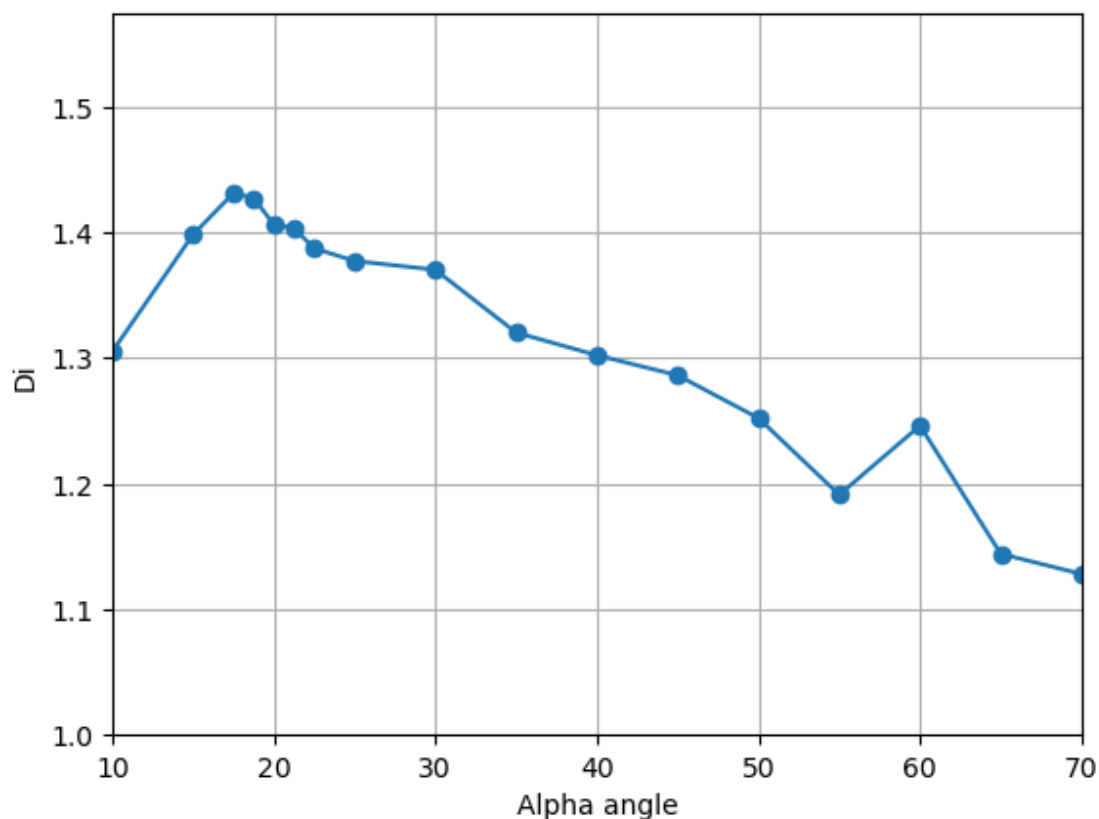


Рис. 10: Зависимость диодности от угла  $\alpha$

В результате параметрического исследования было выяснено, что наша конфигурация клапана Теслы имеет максимальную диодность при угле  $\alpha$  равным 17,5 градуса.

## Список литературы

- [1] A. Purwidyantri и B. Prabowo, “Tesla Valve Microfluidics: The Rise of Forgotten Technology”, *Chemosensors*, т. 11, с. 256, апр. 2023. DOI: 10.3390/chemosensors11040256.
- [2] Z.-j. Jin, Z.-x. Gao, M.-r. Chen и J.-y. Qian, “Parametric study on Tesla valve with reverse flow for hydrogen decompression”, *International Journal of Hydrogen Energy*, т. 43, № 18, с. 8888—8896, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.014>.
- [3] G. Du, T. R. Alsenani, J. Kumar и др., “Improving thermal and hydraulic performances through artificial neural networks: An optimization approach for Tesla valve geometrical parameters”, *Case Studies in Thermal Engineering*, т. 52, с. 103670, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103670>.
- [4] E. Morganti и G. Pignatelli, “Microfluidics for the treatment of the hydrocephalus”, *Proc. 1st Int. Conf. on Sensing Technology*, янв. 2005.

- [5] X. Song, L. Cui, M. Cao, W. Cao, Y. Park и W. M. Dempster, “A CFD analysis of the dynamics of a direct-operated safety relief valve mounted on a pressure vessel”, *Energy Conversion and Management*, т. 81, с. 407—419, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.021>.
- [6] M. C. J. Gamboa A. R. и F. F. K., “Optimization of the Fixed-Geometry Valve for Increased Micropump Performance.”, *Fluids Engineering.*, нояб. 2003.
- [7] F. Forster и B. Williams, “Parametric Design of Fixed-Geometry Microvalves: The Tesser Valve”, янв. 2002. DOI: 10.1115/IMECE2002-33628.