

# Теоретический метод управления расходом перекачиваемой среды по положению запирающих элементов трубопроводной арматуры



Александр КРАВЧУК



Анжелика КРАВЧУК



Арнольд МИХИЕВИЧ



Николай ГАЙС

*Кравчук Александр Степанович* – Научно-исследовательский политехнический институт – филиал Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь.

*Кравчук Анжелика Ивановна* – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

*Михиевич Арнольд Павлович* – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

*Гайс Николай Юрьевич* – СП ЗАО «Международный деловой альянс», Минск, Беларусь\*.

Любой объект, расположенный в трубопроводе, в том числе расходомер, приводит к падению давления в трубопроводе и необходимости повышения мощности насосов. Поэтому представляется перспективным снизить энергозатраты на перекачку среды в трубопроводе за счёт уменьшения количества расходомеров, устанавливаемых после запорно-регулирующей арматуры, и прогнозировать расход перекачиваемой среды по положению запирающего элемента в арматуре. Это приведёт также к уменьшению затрат на транспортировку сред за счёт уменьшения количества приборов учёта. В статье с целью решения данной комплексной проблемы на трубопроводном транспорте на основе метода конечных элементов решается ряд краевых задач гидромеханики. С целью упрощения знакомства с данными решениями, а также их применения на практике инженерами, в статье предложены «параметрические модели вихревого стационарного течения в таких видах запорно-регулирующей арматуры, как шаровой кран, дисковый затвор,

клиновья задвижка, угловой клапан. Без ущерба общности методики, в качестве примера перекачиваемой среды рассматривается вода. Анализ выполнен средствами FLOTRAN CFD программы ANSYS10 ED».

В статье детально описываются возможности как графического интерфейса, так и командной строки. Создание моделей сопровождается полными комментариями о действиях, что позволяет любому пользователю освоить данные модели. Подробно рассмотрены все этапы построения моделей: построение твёрдой модели, выбор элементов, назначение свойств перекачиваемых сред, назначение краевых условий, а также решение задачи и просмотр результатов. «Установлено, что на расход среды оказывает влияние, как геометрия рассмотренных видов запорно-регулирующей арматуры, так» и положение запирающего элемента. Методика может быть применена для любых конструкций трубопроводной арматуры, связанных с расчётом движения вязкой жидкости.

**Ключевые слова:** вязкость жидкости, вихревое течение, стационарное течение, несжимаемая жидкость, параметрическое моделирование, запорно-регулирующая арматура, ANSYS, FLOTRAN.

\*Информация об авторах:

**Кравчук Александр Степанович** – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории динамики систем и механики материалов Научно-исследовательского политехнического института – филиала Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, [ask\\_belarus@inbox.ru](mailto:ask_belarus@inbox.ru).

**Кравчук Анжелика Ивановна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры веб-технологий и компьютерного моделирования Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, [anzhelika.kravchuk@gmail.com](mailto:anzhelika.kravchuk@gmail.com).

**Михиевич Арнольд Павлович** – аспирант кафедры био- и наномеханики, механико-математический факультета Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, [fakel.arnold@gmail.com](mailto:fakel.arnold@gmail.com).

**Гайс Николай Юрьевич** – инженер-программист, СП ЗАО «Международный деловой альянс», Минск, Беларусь, [craderua@gmail.com](mailto:craderua@gmail.com).

Статья поступила в редакцию 22.07.2019, актуализирована 12.12.2019, принята к публикации 15.01.2020.

For the English text of the article please see p. 36.

**Н**астоящая статья написана на основе магистерской диссертации А. П. Михиевича [1] и дипломной работы Н. Ю. Гайса [2], выполненных под руководством доктора физико-математических наук А. С. Кравчука.

«До настоящего времени все гидродинамические расчёты трубопроводов проводились с использованием полуэмпирических формул, полученных в основном для ламинарного течения среды в трубопроводе, в которых присутствуют экспериментально определяемые коэффициенты с учётом чисел Рейнольдса. С помощью такого подхода учитываются разнообразные эффекты, возникающие при перекачке среды и возможного возникновения в этих случаях вихрей и других явлений, снижающих скорость движения среды» [1, с. 6].

«Основной слабостью данных методик является интуитивность и сложность адекватного определения необходимых значений чисел Рейнольдса и невозможность теоретически прогнозировать расход перекачиваемой среды через запорно-регулирующую арматуру» без установки дополнительных приборов учёта (расходомеров), что существенно повышает стоимость строительства и эксплуатации трубопроводов [1, с. 6; 2, с. 6].

Кроме того, поскольку очевидно, что любой прибор учёта является препятствием на пути среды, то установка любого дополнительного оборудования на пути перекачиваемого потока приводит к падению давления [1; 2]. Хотя оно и «незначительно, но многое зависит от количества приборов учёта на длине трассы, что может привести к существенному увеличению затрат электроэнергии на перекачку среды» [1, с. 6; 2, с. 6].

Соответственно, одним из очевидных путей уменьшения энерго- и ресурсозатрат на эксплуатацию трубопроводного транспорта является максимальное упрощение оснащения трубопроводов (существенное снижение количества контрольно-измерительной аппаратуры), а также использование расчётно-теоретической методики управления расходом среды и её перераспределения «по потокам с помощью таких современных средств анализа вихревого течения жидкости и газа, как ANSYS с модулем FLOTRAN» [1, с. 6; 2, с. 6].

Предлагаемые параметрические модели запорно-регулирующей арматуры позволяют отказаться от установки дополнительных расходомеров на трассе трубопровода, а определять расход среды по геометрическому положению запирающего элемента, которое, в частности, для некоторых конструкций может определяться углом отклонения рукоятки от осевого направления потока [1; 2; 8].

1. Краткое описание задачи. «В силу симметричности задач и необходимости экономии элементов рассматриваются параметрические трёхмерные модели внутреннего объёма половины шарового крана, дискового затвора, клапана и клиновой задвижки, которые получены их сечением продольной плоскостью. Во всех случаях отброшенная (симметричная) часть внутреннего объёма запорно-регулирующей аппаратуры заменяется соответствующими краевыми условиями для потока (нулевыми скоростями потока в направлении перпендикулярном плоскости симметрии).

Краевая задача для исследования турбулентного течения среды в запорно-регулирующей арматуре выполнялась

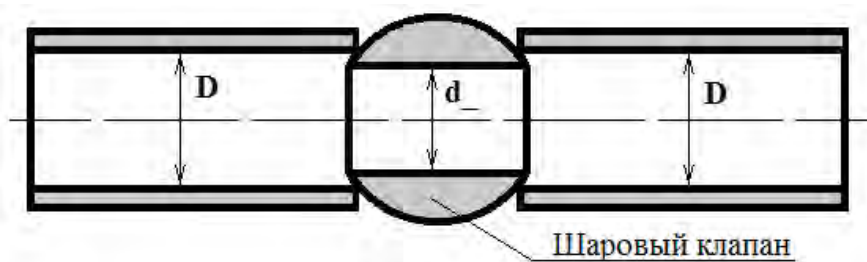


Рис. 1. Схема осевого сечения шарового крана в вертикальной плоскости [1; 2]. Авторский рисунок.



Рис. 2. Осевое сечение шарового крана горизонтальной плоскостью [1; 2]. Авторский рисунок.

с учётом гипотезы о полном прилипании среды к внутренней поверхности арматуры» [1, с. 19].

«Так как все строящиеся модели будут параметрическими, то перед началом построения любой из моделей необходимо ввести все перечисленные в постановке задачи параметры с их значениями» [1, с. 19].

2. Создание конечно-элементной модели внутреннего пространства шарового крана. Шаровой кран – один из самых распространённых типов запорно-регулирующей арматуры. Все краны имеют схожую конструкцию и достаточно продемонстрировать методику на одном из вариантов исполнения запирающего элемента. В данной статье в качестве примера расчёта крана выбран наиболее распространённый в настоящее время шаровой кран [1; 2; 5; 6].

В случае построения модели внутреннего пространства шарового крана (рис. 1) используются следующие параметры [1; 2]:  $D = 1$  (м) – диаметр внутреннего пространства трубы [1; 2];  $d_0 = 0,95$  (м) – диаметр отверстия в шаровом запирающем элементе (клапане) [1; 2];  $\Phi_i = 45$  (градусы) – угол между плоскостями симметрии запирающего элемента и плоскостью симметрии входа и выхода из крана (рис. 2) [1; 2];  $V = 0,2$  (м/с) – скорость перекачки жидкости [1; 2];  $P = 3 \cdot (1E+5)$  (Па) – манометрическое давление в трубопроводе [1; 2].

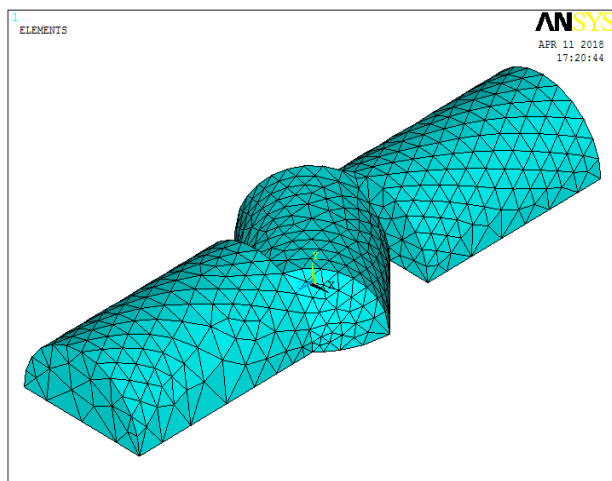
В данной модели радиус запирающего элемента (шарового клапана) вычисляемый параметр, хотя пользователь при необходимости может задавать его значения вручную [1; 2].

Список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства

Таблица 1

Список команд построения конечно-элементной модели внутреннего объёма шарового крана [1; 2]

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, PipingCrane, 0	19.	CSYS, 0
2.	D = 1	20.	BTOL, 0.10E-5
3.	$d_0 = 0.95$	21.	VADD, 1, 6, 2
4.	$\Phi_i = 45$	22.	BTOL, DEFA
5.	$V = 0.2$	23.	AADD, 20, 21, 16, 17, 24, 28, 18, 13, 31, 30
6.	$P = 3 \cdot (1E+5)$	24.	NUMCMP, ALL
7.	$\Phi_i = \text{ACOS}(-1)$	25.	ET, 1, FLUID142
8.	/PREP7	26.	SMRTSIZE, 4
9.	CYLIND, D/2, 0, -D/2, -2 * D, 0, 180	27.	MSHAPE, 1, 3D
10.	CYLIND, D/2, 0, D/2, 2 * D, 0, 180	28.	VMESH, 1
11.	CYLIND, $d_0/2, 0, -D/2/\text{COS}(45/180 \cdot \Phi_i), D/2/\text{COS}(45/180 \cdot \Phi_i), 0, 180$	29.	ASEL, S, AREA,, 4, 10
12.	SPH4, 0, 0, $D/2/\text{COS}(45/180 \cdot \Phi_i)$	30.	DA, ALL, VX, 0, 1
13.	VDELE, 4,,, 0	31.	DA, ALL, VY, 0, 1
14.	ADELE, 17,,, 1	32.	DA, ALL, VZ, 0, 1
15.	VSBA, 3, 16,, DELETE, DELETE	33.	ASEL, ALL
16.	VDELE, 4, 5, 1, 1	34.	DA, 2, VY, 0, 1
17.	CSYS, 5	35.	DA, 3, VZ, -V, 1
18.	VGEN, 2, 6,,, FI,,, 1	36.	DA, 1, PRESS, 0, 1



**Рис. 3. Конечно-элементная модель половины внутреннего объёма шарового крана [1; 2]. Авторский рисунок.**

шарового крана, симметричного относительно продольной плоскости, приведён в таблице 1 [1; 2].

Строка № 1 (табл. 1) определяет имя решения PipingCrane с сохранением имён открытых файлов задачи (файла ошибок, результатов и т.д.), с которыми будет осуществляться обмен данными.

Строки № 2–6 задают значения параметров задачи.

В строке № 7 устанавливается значение константы  $\pi$  с наилучшей для ANSYS точностью.

Строка № 8 содержит команду входа в препроцессор.

Строки № 9–24 производят построение верхней половины объёма шарового крана посредством:

- создания полуцилиндров (строки № 9–11);
- создания шара (строка № 12);
- удаления внутреннего объёма шара с сохранением его поверхности (строка № 13);
- удаления ненужной полусферы вместе со вспомогательными линиями и ключевыми точками (строка № 14);
- деления полуцилиндра, имитирующего отверстие в шаровом кране с помощью построенной на предыдущих шагах полусферы (команда № 15);
- удаления ненужных объёмов, полученных после проведения последней операции (команда № 16);
- смены глобальной системы координат на цилиндрическую (команда № 17);

- поворота полуцилиндра, имитирующего отверстие в запирающем элементе на заданный угол FI (команда № 18);

- активизации глобальной декартовой системы координат (команда № 19);

- изменения точности проведения построений (команда № 20);

- сложения объёмов (команда № 21);

- возвращения точности выполнения операций по умолчанию (команда № 22);

- сложения поверхностей в плоскости симметрии крана (рис. 2), для упрощения задания краевых условий (команда № 23);

- сжатия нумерации всех геометрических компонент модели (команда № 24).

Далее в таблице 1 приводятся команды № 25–28 создания конечно-элементной сетки.

Команда № 25 выбирает объёмный элемент для моделирования течения среды FLUID142.

Команда № 26 устанавливает параметр SMRTSIZE для автоматического контроля точности построения свободного разбиения.

Команда № 27 устанавливает параметр, свидетельствующий, что разбиение будет выполнено пирамидальными элементами.

Команда № 28 строит свободное разбиение созданной ранее геометрической модели (рис. 3).

Заканчивают список команд таблицы 1 команды № 29–36 задания краевых условий.

Команды № 29–32 выбирают внешние поверхности модели и задают в них краевые условия прилипания.





**Рис. 4.** Крупный затвор с плоскоскошенным диском, использовавшийся на гидроэлектростанции в Японии [1; 2].  
[Электронный ресурс]: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yagisawa\\_power\\_station\\_inlet\\_valve.jpg?uselang=ru](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yagisawa_power_station_inlet_valve.jpg?uselang=ru). Доступ 22.07.2019.

Команда № 33 отменяет выбор внешних поверхностей.

Команда № 34 задаёт краевое условие, соответствующее симметричности задачи.

Команды № 35 и 36 задают краевые условия на входе и выходе крана.

3. Создание конечно-элементной модели половины внутреннего пространства дискового затвора, симметричного относительно горизонтальной плоскости [1; 2]. Дисковый затвор – тип трубопроводной арматуры, в котором запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды [1; 2; 5; 6] (рис. 4).

Для построения модели симметричной половины внутреннего объёма дискового затвора (рис. 4) с плоскоскошенным диском используются следующие параметры [1; 2]:  $D = 1(\text{м})$  – внутренний проходной диаметр дискового затвора и самого диска [1; 2];  $H_{\text{MAX}} = 0,1(\text{м})$  – максимальная толщина плоско скошенного диска в середине [1; 2];  $H_{\text{MIN}} = 0,03(\text{м})$  – минимальная толщина диска на его краях [1; 2];  $F_i = 45$  (градусы) – угол открытия диска [1; 2];

**Таблица 2**

**Координаты точек для построения половины продольного сечения внутреннего пространства дискового затвора [1; 2]**

KP	X-Loc	Y-Loc	Z-Loc
1	0	0	-H_MAX/2
2	D/2	0	-H_MIN/2
3	D/2	0	H_MIN/2
4	0	0	H_MAX/2

$L = 2 \cdot D$  – расстояние от входного сечения до диска затвора и от диска затвора до выходного сечения в модели [1; 2];  $V = 0,5$  (м/с) – скорость перекачки жидкости [1; 2];  $P = 3 \cdot (1E+5)$  (Па) – манометрическое давление в трубопроводе [1; 2].

При построении модели дискового затвора используются четыре вспомогательные ключевые точки с координатами, перечисленными в таблице 2 [1; 2].

Список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства затвора с плоскоскошенным диском, симметричного относительно продольной горизонтальной плоскости (рис. 4), приведён в таблице 3 [1; 2].

Строка № 1 (табл. 3) определяет имя файла решения ButterflyValve.

Строки № 2–8 задают значения параметров задачи.

В строке № 9 устанавливается значение константы  $\pi$  с наилучшей для ANSYS точностью.

Строка № 10 содержит команду входа в препроцессор.

Строки № 11–36 производят построение верхней половины объёма шарового крана посредством:

- создания четырёх ключевых точек (строки № 11–14) с координатами из таблицы 2;
- симметричного отображения двух точек (строка № 15);
- создания поверхности по ключевым точкам (строка № 16);
- создания полуцилиндра, имитирующего затвор (строка № 17);
- вытягивания объёма из предварительно созданной по ключевым точкам поверхности (строка № 18);
- деления полуцилиндра, имитирующего затвор, боковыми поверхностями, созданного объёма (команды № 19–22);

**Список команд построения конечно-элементной модели  
внутреннего объёма дискового затвора [1; 2]**

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, ButterflyValve, 0	33.	CSYS, 0
2.	D = 1	34.	CYLIND, D/2, 0, -L, L, 0, 180
3.	Fi = 45	35.	VSBV, 1, 2,, DELETE, DELETE
4.	H_MAX = 0.1	36.	NUMCMP, ALL
5.	H_MIN = 0.03	37.	ET, 1, FLUID142
6.	L = 2 • D	38.	SMRTSIZE, 8
7.	V = 0.5	39.	ESIZE, D/5
8.	P = 3 • (1E+5)	40.	MSHAPE, 1, 3D
9.	Pi = ACOS(-1)	41.	VMESH, ALL
10.	/PREP7	42.	ASEL, S, AREA,, 3, 12, 1, 1
11.	K, 1, 0, 0, -H_MAX/2	43.	NSLA, S, 1
12.	K, 2, D/2, 0, -H_MIN/2	44.	D, ALL, VX, 0
13.	K, 3, D/2, 0, H_MIN/2	45.	D, ALL, VY, 0
14.	K, 4, 0, 0, H_MAX/2	46.	D, ALL, VZ, 0
15.	KSYMM, X, 2, 3, 1	47.	ASEL, ALL
16.	A, 1, 2, 3, 4, 6, 5	48.	NSEL, ALL
17.	CYLIND, D/2, 0, -H_MAX/2, H_MAX/2, 0, 180	49.	ASEL, S, AREA,, 15,, 1
18.	VOFFST, 1, -D	50.	NSLA, S, 1
19.	VSBA, 1, 11,, DELETE, KEEP	51.	D, ALL, VX, 0
20.	VSBA, 4, 10,, DELETE, KEEP	52.	D, ALL, VY, 0
21.	VSBA, 5, 8,, DELETE, KEEP	53.	D, ALL, VZ, 0
22.	VSBA, 6, 13,, DELETE, KEEP	54.	ASEL, ALL
23.	VDELE, 1, 5, 1, 1	55.	NSEL, ALL
24.	CYLIND, 0.2 • D/2, 0, -L, L, 0, 360	56.	ASEL, S, AREA,, 13, 14,, 1
25.	CSYS, 5	57.	NSLA, S, 1
26.	VGEN, 2, 1,,,, 90,,,, 1	58.	D, ALL, VY, 0
27.	CSYS, 1	59.	ASEL, ALL
28.	VGEN, 2, 1,,,, 90,,,, 1	60.	NSEL, ALL
29.	CSYS, 0	61.	ESEL, ALL
30.	VADD, ALL	62.	DA, 2, VZ, -V, 1
31.	CSYS, 5	63.	DA, 1, PRESS, 0, 1
32.	VGEN, 2, 2,,,, FI,,,, 1	64.	--

• удаления ненужных объёмов, полученных после проведения последних операций, вместе с их поверхностями, рёбрами и ключевыми точками (команда № 23);

• создания цилиндра (рис. 5), соответствующего вертикальному валу затвора (команда № 24);

• включения глобальной цилиндрической системы координат и поворота цилиндра, имитирующего вал запирающего элемента на угол 90° (команды № 25–28);

• активизации глобальной декартовой системы координат (команда № 29);

• сложения построенных объёмов затвора и вала (команда № 30);

• включения глобальной цилиндрической системы координат и поворота затвора на заданный угол FI (команды № 31 и 32);

• активизации глобальной декартовой системы координат (команда № 33);

• построения полуцилиндра внутреннего объёма (команда № 34);

• вычитания из объёма построенного цилиндра объёма, моделирующего затвор (команда № 35);

• сжатия нумерации всех геометрических компонент модели (команда № 36).

Далее в таблице 3 приводятся команды № 37–41 создания конечно-элементной



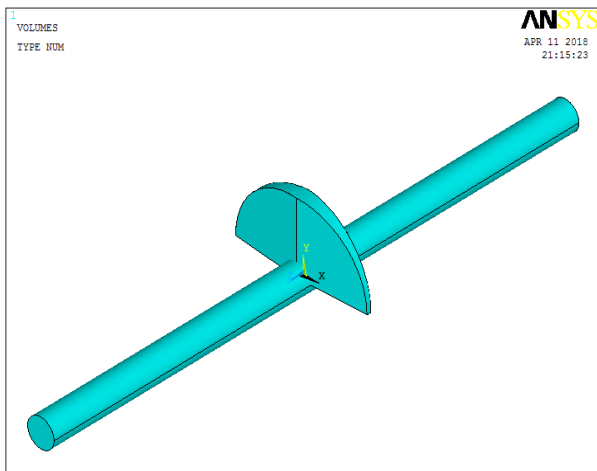


Рис. 5. Начальное положение плоскоскошенного затвора и его вала [1; 2]. Авторский рисунок.

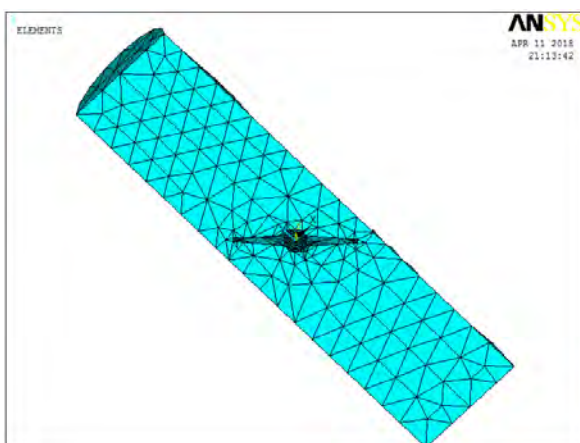


Рис. 6. Конечно-элементная модель половинного внутреннего объёма дискового затвора [1; 2]. Авторский рисунок.

сетки. Команда № 37 выбирает объёмный элемент для моделирования течения среды FLUID142. Команда № 38 устанавливает параметр SMRTSIZE для автоматического контроля точности построения свободного разбиения (большое значение этого параметра гарантирует малое количество элементов, соответствующее учебной версии ANSYS10 ED). Команда № 39 устанавливает ориентировочный размер ребра элемента относительно величины параметра D модели. Команда № 40 устанавливает параметр, свидетельствующий, что разбиение будет выполнено пирамидальными элементами. Команда № 41 выполняет разбиение построенного объёма (рис. 6).

Заканчивают список команд таблицы 3 команды № 42–61 задания краевых условий на узлах конечно-элементной сетки

и далее идут две команды № 62 и 63 задания краевых условий на поверхностях, имитирующих вход и выход модели. Это существенно отличает данную модель от предыдущей, т.к. в данном случае краевые условия задаются непосредственно на компонентах конечно-элементного разбиения, а не на компонентах геометрической модели.

Команды № 42–53 выбирают внешние поверхности модели и узловые точки конечно-элементного разбиения, находящиеся на этих поверхностях, для задания на них краевых условий прилипания. Команды № 54 и 55 отменяют выбор внешних поверхностей и узловых точек на них. Команды № 56–58 выбирают поверхность плоскости симметрии и узловые точки на ней для определения краевого условия,

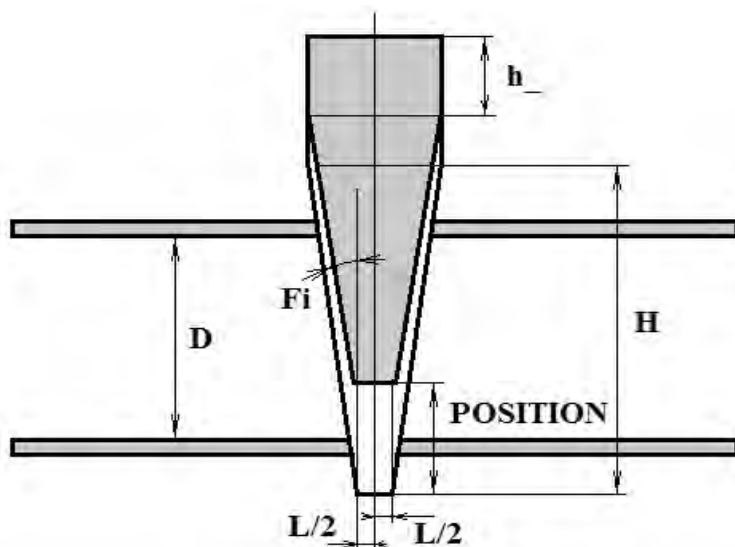


Рис. 7. Клиновидная задвижка [1; 2]. Авторский рисунок.

Таблица 4

Координаты точек для построения половины продольного сечения внутреннего пространства тройника [1; 2]

KP	X-Loc	Y-Loc	Z-Loc
1	0	-H/2	-L/2
2	0	-H/2	L/2
3	0	H/2	$L/2 + H \cdot \tan(Fi/180 \cdot \pi)$
4	0	H/2	$L/2 + H \cdot \tan(Fi/180 \cdot \pi)$
5	0	H/2	$-L/2 - H \cdot \tan(Fi/180 \cdot \pi)$
6	0	H/2	$-L/2 - H \cdot \tan(Fi/180 \cdot \pi)$

соответствующего симметрии данной задачи. Команды № 59–61 отменяют выбор поверхностей на плоскости симметрии, узловых точек и элементов на них. Команды № 62 и 63 задают краевые условия на входе и выходе дискового затвора.

4. Создание конечно-элементной модели внутреннего пространства клиновидной задвижки [1; 2]. Задвижка – промышленная трубопроводная арматура, в которой запорный орган перемещается возвратно-поступательно перпендикулярно оси потока рабочей среды [1–4]. Возможно применение задвижек для двухпозиционного (дискретного) регулирования потока рабочей среды [1; 2]. Перекрытие в задвижках осуществляется за счёт запорного элемента, перегораживающего поток. В данной статье рассматривается клиновидная задвижка (рис. 7) [1; 2].

Для построения модели внутреннего объёма клиновидной задвижки (рис. 7) ис-

пользуются следующие параметры [1; 2]:  $D = 1$  (м) – внутренний входной и выходной диаметр трубы [1; 2];  $H = 1$  (м) – высота клина [1; 2];  $h_ = D$  (м) – высота параллельной части задвижки [1; 2];  $POSITION = 0,5 \cdot H$  (м) – положение задвижки относительно полного закрытия [1; 2];  $L = 0,05$  (м) – минимальная толщина клина [1; 2];  $Fi = 5$  (градусов) – угол наклона боковых плоскостей задвижки [1; 2];  $V = 0,5$  (м/с) – скорость перекачки жидкости;  $P = 3 \cdot (1E+5)$  (Па) – манометрическое давление в трубопроводе (рис. 7) [1; 2].

При построении модели клиновидной задвижки используются шесть вспомогательных ключевых точек с координатами, перечисленными в таблице 4 [1; 2].

Список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства клиновидной задвижки, симметричного относительно продольной верти-







**Список команд построения конечно-элементной модели и задания краевых условий  
внутреннего объёма клиновой задвижки [1; 2]**

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, WedgeGateValve, 0	29.	CYLIND, D/2, 0, -2 * D, 2 * D, 90, 270
2.	D = 1	30.	VADD, 1, 3
3.	H = 1.05	31.	VSBV, 4, 2,, DELETE, DELETE
4.	h_ = D	32.	AADD, 20, 19, 36, 7, 21
5.	Fi = 5	33.	ET, 1, FLUID142
6.	V = 0.5	34.	SMRTSIZE, 8
7.	L = 0.05	35.	ESIZE, D/5
8.	POSITION = 0.5 * H	36.	MSHAPE, 1, 3D
9.	P = 3 * (1E+5)	37.	VMESH, 1
10.	Pi = ACOS(-1)	38.	ASEL, S, AREA,, 32, 35, 1
11.	/PREP7	39.	ASEL, A, AREA,, 37
12.	K, 1, 0, -H/2, -L/2	40.	ASEL, A, AREA,, 5, 6, 1
13.	K, 2, 0, -H/2, L/2	41.	ASEL, A, AREA,, 1, 10, 9
14.	K, 3, 0, H/2, L/2+H * TAN(FI/180 * PI)	42.	ASEL, A, AREA,, 25, 26, 1
15.	K, 4, 0, H/2 + h_, L/2 + H * TAN(FI/180 * PI)	43.	DA, ALL, VX, 0, 1
16.	K, 5, 0, H/2 + h_, -L/2 - H * TAN(FI/180 * PI)	44.	DA, ALL, VY, 0, 1
17.	K, 6, 0, H/2, -L/2 - H * TAN(FI/180 * PI)	45.	DA, ALL, VZ, 0, 1
18.	*DO, i, 1, 5	46.	ASEL, ALL
19.	LSTR, i, i+1	47.	ASEL, S, AREA,, 23, 24, 1
20.	*ENDDO	48.	ASEL, A, AREA,, 27, 28, 1
21.	LSTR, 6, 1	49.	ASEL, A, AREA,, 2
22.	AL, 1, 2, 3, 4, 5, 6	50.	DA, ALL, VX, 0, 1
23.	VOFFST, 1, H/2	51.	DA, ALL, VX, 0, 1
24.	CYLIND, H/2, 0, -H, H, 180, 270	52.	DA, ALL, VX, 0, 1
25.	VSBA, 1, 11,, DELETE, DELETE	53.	ASEL, ALL
26.	VDELE, 2, 3, 1, 1	54.	DA, 18, VZ, -V, 1
27.	NUMCMP, ALL	55.	DA, 17, PRESS, 0, 1
28.	VGEN, 2, 1,,,, POSITION	56.	---

кальной плоскости (рис. 7), приведён в таблице 5 [1; 2].

Строка № 1 (табл. 5) определяет имя файла решения WedgeGateValve.

Строки № 2–9 задают значения параметров задачи.

В строке № 10 устанавливается значение константы  $\pi$  с наилучшей для ANSYS точностью.

Строка № 11 содержит команду входа в препроцессор.

Строки № 12–32 производят построение половины объёма клиновой задвижки посредством:

- создания шести ключевых точек образующих профиль клиновой задвижки (строки № 12–17) с координатами из таблицы 4;
- построения линий, соединяющих построенные ключевые точки, с исполь-

зованием оператора цикла (строки № 18–21);

- создания поверхности профиля задвижки по линиям (строка № 22);
- вытягивания профиля задвижки (строка № 23);
- построения вспомогательной четверти цилиндра (строка № 24);
- деления объёма, построенного вытягиванием боковой плоскостью четверти цилиндра (команды № 25);
- удаления ненужных объёмов, полученных после проведения последних операций, вместе с их поверхностями, рёбрами и ключевыми точками (команда № 26);
- сжатия нумерации всех геометрических компонент модели (команда № 27);
- создания копии объёма, соответствующего задвижке на заданном расстоянии POSITION (команда № 28);

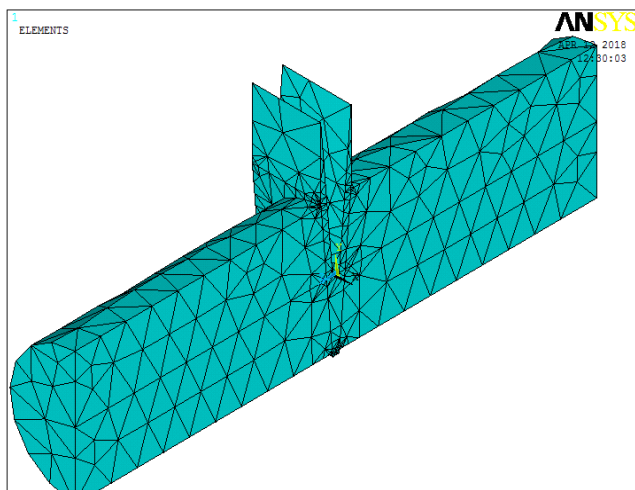


Рис. 8. Конечно-элементное разбиение модели половины внутреннего объёма клиновой задвижки [1; 2]. Авторский рисунок.

- построения полуцилиндра внутреннего объёма (команда № 29);
- сложения первого и третьего (последнего) объёмов (команда № 30);
- вычитания из результата сложения второго объёма, построенного сдвигом, и моделирующего положение задвижки (команда № 31);
- сложения боковых поверхностей вертикального сечения задвижки для упрощения задания краевых условий (команда № 32).

Далее в таблице 5 приводятся команды № 33–37 создания конечно-элементной сетки (рис. 8). Их описание полностью соответствует предыдущему примеру (команды № 37–41 таблицы 3).

Заканчивают список команд таблицы 5 команды № 38–55 задания краевых условий на компонентах геометрической модели. Команды № 38–45 выбирают внешние поверхности модели для задания на них краевых условий прилипания. Команда № 46 отменяет выбор внешних поверхностей. Команды № 47–52 выбирают поверхности плоскости симметрии для определения краевого условия, соответствующего симметрии данной задачи. Команда № 53 отменяет выбор поверхностей на плоскости симметрии. Команды № 54 и 55 задают краевые условия на входе и выходе клиновой задвижки.

5. Создание конечно элементной модели внутреннего пространства углового клапана [1; 2]. Клапан – промышленная

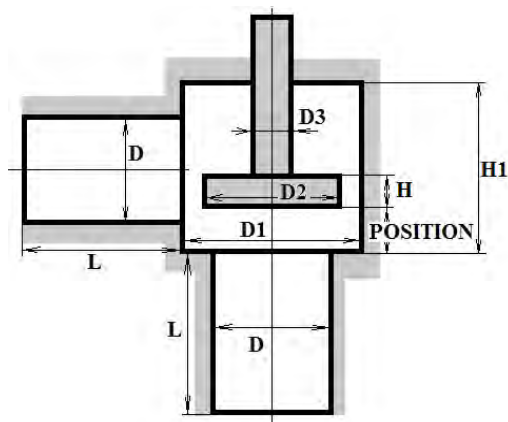


Рис. 9. Разрез углового клапана [1; 2]. Авторский рисунок.

трубопроводная арматура, в которой запорный или регулирующий орган перемещается возвратно-поступательно параллельно оси потока рабочей среды (рис. 9) [1; 2; 5; 6]. До 1981 года клапан, в котором запирающий элемент перемещается с помощью винтовой пары и управляется вручную, обычно называли вентилем [1; 2]. Сейчас термин «вентиль» не допускается к использованию ГОСТом [7].

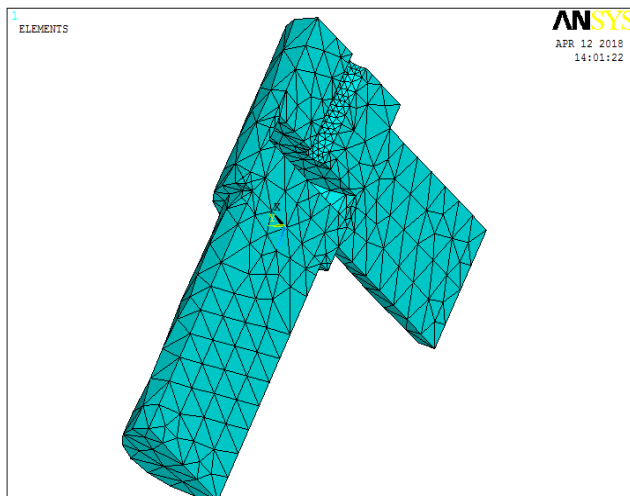
Для построения модели внутреннего объёма углового клапана (рис. 9) используются следующие параметры [1; 2]:  $D = 0,5$  (м) – внутренний диаметр трубы [1; 2];  $D1 = 0,6$  (м) – диаметр камеры клапана [1; 2];  $D2 = 0,55$  (м) – диаметр запирающего элемента клапана [1; 2];  $D3 = 0,1$  (м) – диаметр стержня запирающего элемента [1; 2];





## Команды построения конечно-элементной модели объёма углового клапана [1; 2]

№	Команда	№	Команда
1.	/FILENAME, Valve, 0	49.	D, ALL, VY, 0
2.	D = 0.5	50.	D, ALL, VZ, 0
3.	D1 = 0.6	51.	ASEL, ALL
4.	D2 = 0.55	52.	NSEL, ALL
5.	D3 = 0.1	53.	ASEL, S, AREA,, 28, 34, 6, 1
6.	H = 0.1	54.	NSLA, S, 1
7.	H1 = D+2•H	55.	D, ALL, VX, 0
8.	L = 2•D	56.	D, ALL, VY, 0
9.	POSITION = 2•H	57.	D, ALL, VZ, 0
10.	V = 0.5	58.	ASEL, ALL
11.	P = 3•(1E+5)	59.	NSEL, ALL
12.	Pi = ACOS(-1)	60.	ASEL, S, AREA,, 26,,, 1
13.	/PREP7	61.	NSLA, S, 1
14.	CYLIND, D/2, 0, L, 0, 0, 180	62.	D, ALL, VX, 0
15.	CYLIND, D1/2, 0, 0, -H1, 0, 180	63.	D, ALL, VY, 0
16.	CYLIND, D/2, 0, L, 0, 0, 180	64.	D, ALL, VZ, 0
17.	CSYS, 5	65.	ASEL, ALL
18.	VGEN, 2, 3,,, 270,,, 1	66.	NSEL, ALL
19.	CSYS, 0	67.	ASEL, S, AREA,, 4, 5, 1, 1
20.	VGEN, 2, 3,,,, -(H+D/2),,, 1	68.	NSLA, S, 1
21.	CYLIND, D2/2, 0, 0, -H, 0, 180	69.	D, ALL, VY, 0
22.	CYLIND, D3/2, 0, -H/2, -L, 0, 180	70.	ASEL, ALL
23.	VADD, 1, 2, 3	71.	NSEL, ALL
24.	VADD, 4, 5	72.	ASEL, S, AREA,, 22, 23, 1, 1
25.	VGEN, 2, 1,,,, -POSITION,,, 1	73.	NSLA, S, 1
26.	VSBE, 6, 1,, DELETE, DELETE	74.	D, ALL, VY, 0
27.	ET, 1, FLUID142	75.	ASEL, ALL
28.	SMRTSIZE, 8	76.	NSEL, ALL
29.	ESIZE, D/5	77.	ASEL, S, AREA,, 29, 30, 1, 1
30.	MSHAPE, 1, 3D	78.	NSLA, S, 1
31.	VMESH, ALL	79.	D, ALL, VY, 0
32.	ASEL, S, AREA,, 1, 3, 2, 1	80.	ASEL, ALL
33.	NSLA, S, 1	81.	NSEL, ALL
34.	D, ALL, VX, 0	82.	ASEL, S, AREA,, 16, 19, 3, 1
35.	D, ALL, VY, 0	83.	NSLA, S, 1
36.	D, ALL, VZ, 0	84.	D, ALL, VY, 0
37.	ASEL, ALL	85.	ASEL, ALL
38.	NSEL, ALL	86.	NSEL, ALL
39.	ASEL, S, AREA,, 17, 18, 1, 1	87.	ASEL, S, AREA,, 33,,, 1
40.	NSLA, S, 1	88.	NSLA, S, 1
41.	D, ALL, VX, 0	89.	D, ALL, VY, 0
42.	D, ALL, VY, 0	90.	ASEL, ALL
43.	D, ALL, VZ, 0	91.	NSEL, ALL
44.	ASEL, ALL	92.	NSEL, ALL
45.	NSEL, ALL	93.	ESEL, ALL
46.	ASEL, S, AREA,, 15, 20, 5, 1	94.	DA, 2, VZ, -V, 1
47.	NSLA, S, 1	95.	DA, 12, PRESS, 0, 1
48.	D, ALL, VX, 0	96.	---



**Рис. 10. Конечно-элементное разбиение модели половины внутреннего объёма углового клапана [1; 2]. Авторский рисунок.**

$H = 0,1$  (м) – высота запирающего элемента стрелы [1; 2];  $H1 = D + 2 \cdot H$  – высота камеры [1; 2];  $POSITION = 2 \cdot H$  – положение запирающего элемента относительно крайнего нижнего состояния «полностью перекрыто» [1; 2];  $L = 2 \cdot D$  – длина трубы [1; 2];  $V = 0,5$  (м/с) – скорость перекачки жидкости [1; 2];  $P = 3 \cdot (1E+5)$  (Па) – манометрическое давление в трубопроводе [1; 2].

Список команд для задания параметров, начала работы в препроцессоре, построения половины внутреннего пространства углового клапана (рис. 9), симметричного относительно продольной вертикальной плоскости, приведён в таблице 6 [1; 2].

Строка № 1 (табл. 6) определяет имя файла решения Valve.

Строки № 2–11 задают значения параметров задачи.

В строке № 12 устанавливается значение константы  $\pi$  с наилучшей для ANSYS точностью.

Строка № 13 содержит команду входа в препроцессор.

Строки № 14–26 производят построение половины объёма клиновой задвижки посредством:

- создания трёх полуцилиндров (строки № 14–16);
- переключения в цилиндрическую систему координат (строка № 17);
- поворота одного из полуцилиндров (строка № 18);
- возвращения в глобальную декартову систему координат (строка № 19);

- смещения поворачиваемого полуцилиндра (строка № 24);

- создания двух вспомогательных полуцилиндров, имитирующих запирающий элемент на валу (команды № 21–22);

- сложения первых трёх полуцилиндров, имитирующих внутренний объём углового клапана (команда № 23);

- сложения последних двух полуцилиндров, имитирующих запирающий элемент и вал (команда № 24);

- сдвига запирающего элемента в положение POSITION (команда № 25);

- вычитания объёма запирающего элемента из внутреннего объёма клапана (команда № 26).

Далее в таблице 6 приводятся команды № 27–31 создания конечно-элементной сетки (рис. 10). Их описание полностью соответствует предыдущему примеру (команды № 37–41 таблицы 3).

Заканчивают список команд таблицы 6 команды № 32–93 задания краевых условий на узлах конечно-элементной сетки, и далее идут две команды № 94 и 95 задания краевых условий на поверхностях, имитирующих вход и выход клапана. Отметим, что описание команд № 32–93 (табл. 6) полностью соответствует описанию команд № 42–61 таблицы 3. При этом задание краевых условий командами № 94 и 95 из таблицы 6 неоднократно комментировалось в предыдущих примерах.

6. Задание физических свойств несжимаемой жидкости для всех конструкций

Таблица 7

**Список команд задающих свойства среды [1; 2]**

№	Команда
1.	FLDATA7, PROT, DENS, CONSTANT
2.	FLDATA8, NOMI, DENS, 1000
3.	FLDATA7, PROT, VISC, CONSTANT
4.	FLDATA8, NOMI, VISC, 0.000894
5.	FLDATA7, PROT, COND, CONSTANT
6.	FLDATA8, NOMI, COND, -1
7.	FLDATA7, PROT, SPHT, CONSTANT
8.	FLDATA8, NOMI, SPHT, -1
9.	FLDATA15, PRES, REFE, P

Таблица 8

**Список команд для определения параметров решателя и решения задачи [1; 2]**

№	Команда
1.	FLDATA1, SOLU, TRAN, 0
2.	FLDATA1, SOLU, TEMP, 0
3.	FLDATA1, SOLU, TURB, 1
4.	FLDATA1, SOLU, COMP, 0
5.	FLDATA24, TURB, MODL, 3
6.	FLDATA37, ALGR, SEGR, SIMPLEN
7.	FLDATA2, ITER, EXEC, 500
8.	FLDATA34, MIR, MOME, 0.35
9.	FINISH
10.	/SOL
11.	SOLVE
12.	FINISH

запорных арматур. Физические свойства жидкости задаются с помощью команд задания свойств жидкости, а также манометрического давления из таблицы 7 [1; 2]. В частности, команды таблицы 7 указывают значение плотности  $1000 \text{ кг/м}^3$  и вязкости  $0,000894 \text{ Па} \cdot \text{с}$  жидкости [1; 2; 8].

Задание термодинамических характеристик невозмущённого потока осуществляется по умолчанию. С помощью команды № 9 таблицы 7 указывается необходимая величина манометрического давления P.

7. Подготовительные мероприятия перед решением поставленных краевых задач течения жидкости и решение задачи [1; 2]. Задание модели течения жидкости необходимо осуществить с помощью команд с 1 по 5 [1; 2]. В 6 строке таблицы 8 приводится команда выбора алгоритма решения вихревой задачи [1; 2].

Несмотря на то, что решается задача стационарная, но во FLOTTRAN при этом используются итерационные алгоритмы, поэтому перед запуском решения задачи необходимо ограничить количество итераций. Назначение количества итераций осуществляется с помощью команды, приведённой в 7 строке таблицы 8.

При решении задачи может возникать ошибка с указанием на то, что в решаемой матрице на определённой итерации получаются отрицательные элементы. Обойти данную ошибку можно с помощью команды 8 в таблице 8 (параметру MIR необходимо присвоить значение 0,35). На этом подготовка любой из рассмотренных задач к решению заканчивается, и для запуска алгоритма решения необходимо использовать команды 10–12 из таблицы 8.

8. Чтение результатов решения задачи на последнем шаге и их отображение [1; 2]. Поскольку вихревые задачи (даже стационарные) решаются итерационно, то, чтобы получить доступ к результатам решения, необходимо прочитать последние по времени данные решения [1; 2]. Выполняется это с помощью пункта меню: Main Menu > General Postproc > Read Results > Last Set [1; 2].

Для отображения результатов в векторном виде необходимо воспользоваться пунктом меню Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot > Predefined [1; 2]. В появившемся окне следует выбрать требуемые результаты в списке и, если необходимо, изменить размеры векторов скоростей потока (рис. 11) [1; 2].

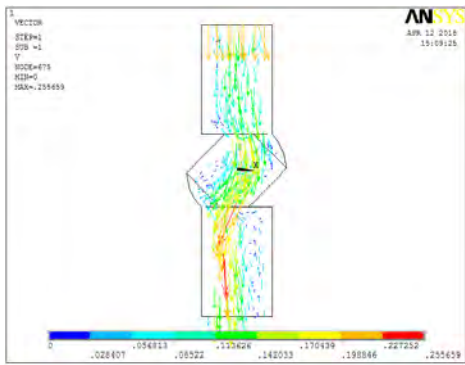
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью решения комплексной проблемы управления и ресурсосбережения на трубопроводном транспорте в статье предложены параметрические модели вихревого стационарного течения в таких видах запорно-регулирующей арматуры, как шаровой кран, дисковый затвор, клиновая задвижка, угловой клапан [1; 2].

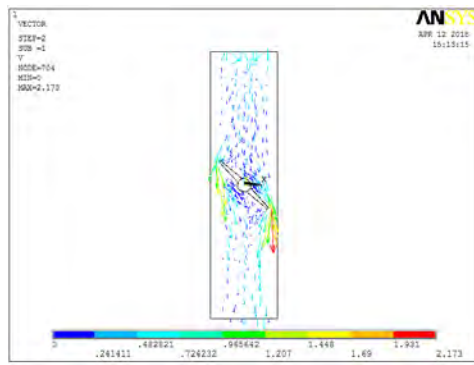
Без ущерба общности методики в качестве примера перекачиваемой среды рассматривается вода [1; 2].

Анализ выполнен средствами FLOTTRAN CFD программы ANSYS10 ED [1; 2].

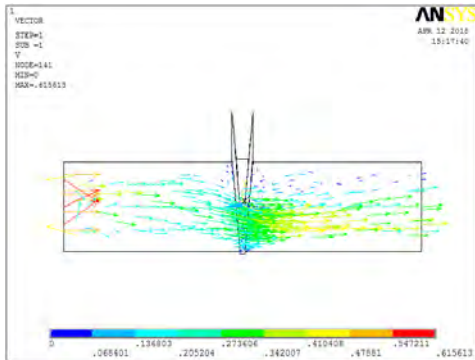
Установлено, что расход среды и скорость её прокачки можно определять по положению запирающего элемента [1; 2].



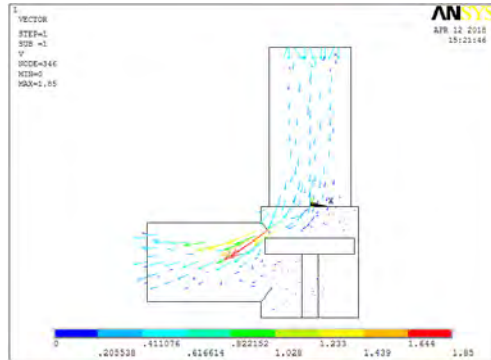
а)



б)



в)



г)

**Рис. 11. Поле скоростей в параметрических моделях запорно-регулирующей арматуры [1; 2]: а) шаровой кран, б) дисковый затвор, в) клиновная задвижка, д) угловой клапан. Авторский рисунок.**

Установлено, что на характер течения и расход среды оказывает влияние как геометрия рассмотренных видов запорно-регулирующей арматуры, так и скорость потока [1; 2].

Предлагаемые модели и методика может быть применена для любых конструкций арматуры, связанных с расчётом движения вязкой жидкости [1; 2].

Для улучшения качества результатов, получаемых на предлагаемых моделях, необходимо в приведённых списках команд только указать значение, улучшающих разбиение параметров [1; 2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михиевич А. П. Моделирование вихревого течения жидкости в трубопроводах с учётом особенностей конструкции запорной арматуры, а также приборов учёта и контроля параметров потока в ANSYS ED10 / Магистерская диссертация по специальности 1-31.80.03 «Механика». – Минск: БГУ, 2018. – 59 с.

2. Гайс Н. Ю. Моделирование вихревого течения жидкости в трубопроводах с учётом особенностей конструкции запорной арматуры, а также

приборов учёта и контроля параметров потока в ANSYS ED10 / Дипломная работа по специальности 1-31.80.03 «Механика». – Минск: БГУ, 2019. – 68 с.

3. Часс С. И. Гидромеханика в примерах и задачах. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. – 216 с.

4. Ковальногов Н. Н., Коврижных Е. Н. Основы гидравлики. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – 86 с.

5. Ерёмкин А. И., Баканова С. В., Канакина О. Н. Запорно-регулирующая арматура в системах отопления. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 88 с.

6. Новиков В. Т. Основы проектирования и оборудование предприятий органического синтеза. Часть 1. Трубопроводная арматура. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 292 с.

7. ГОСТ 24856-81 (ИСО 6552-80) Арматура трубопроводная промышленная. Термины и определения. [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200011740>. Доступ 05.03.2019.

8. Кравчук А. С., Тарасюк И. А. Моделирование стационарного турбулентного обтекания цилиндрического препятствия потоком вязкой несжимаемой жидкости в ступенчатой трубе // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – № 2. – С. 26–31. [Электронный ресурс]: <http://indust-engineering.ru/issues/2017/2017-2.pdf>. Доступ 05.03.2019.

9. Шабаров В. В. Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач. – Нижний Новгород: ННГУ, 2006. – 108 с.

