

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 4 / 2024, Vol. 16, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/41SAVN424.pdf>

DOI: 10.15862/41SAVN424 (<https://doi.org/10.15862/41SAVN424>)

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Алексеев, Д. П. О применении перфорированных дисковых вставок в круглой трубе для формирования газового потока необходимой структуры перед ультразвуковым расходомером / Д. П. Алексеев, А. С. Кубенин // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/41SAVN424.pdf>
DOI: 10.15862/41SAVN424

For citation:

Alekseev D.P., Kubenin A.S. On the use of perforated disk inserts in a round pipe to form a gas flow of the required structure in front of an ultrasonic flow meter. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(4): 41SAVN424. Available at: <https://esj.today/PDF/41SAVN424.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/41SAVN424

Алексеев Дмитрий Павлович

ООО «СовТИГаз», Москва, Россия

Главный специалист

E-mail: alekseev210@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=687192

Кубенин Александр Сергеевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия

Ведущий программист

Кандидат технических наук

E-mail: kube-n@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=935093

О применении перфорированных дисковых вставок в круглой трубе для формирования газового потока необходимой структуры перед ультразвуковым расходомером

Аннотация. В отличие от обычных счетчиков газа, ультразвуковые расходомеры обладают такими преимуществами, как бесконтактный режим работы, минимальные потери давления и высокая точность. При разработке ультразвуковых расходомеров, как и любых других устройств, используются допущения и упрощения, связанные с теорией ультразвуковых расходомеров. При разработке таких устройств исследователи не всегда располагают необходимым местом для разворачивания таких конструкций. Поэтому встает вопрос о разработки устройств, которые могут заменить большие участки трубопроводов с различными поворотами в роли местных сопротивлений. В работе приведены некоторые исследования, проведенные при разработке перфорированного диска, способного формировать профиль потока, аналогичный профилю после двойного отвода. Представленные результаты исследования влияния геометрии перфорированного диска на газодинамику и структуру потока. Расчеты проведены с помощью трехмерного компьютерного моделирования. Выполнен анализ влияния расположения отверстий, их размеров и углов наклона отверстий относительно оси диска на распределение скоростей и формирование профиля скорости ниже по течению от диска и является целью данного исследования. Получены скалярные и векторные поля скоростей ниже по потоку за перфорированным диском. Построены профили скорости в

сечениях за диском. Проведен сравнительный анализ разных конструкций перфорированных дисков. Указаны принципы проектирования таких формователей потока. Выявлены геометрические факторы, влияющие на структуру потока после формователя. Выявленные тонкости и описанные принципы проектирования позволили разработать выпрямители и формователи потока на основе перфорированных дисков. Показаны финальные образцы дисков и результаты их функционирования.

Ключевые слова: газоснабжение; ультразвуковой расходомер; вычислительная газодинамика; компьютерное моделирование; профиль потока; перфорированный диск; формователь потока; геометрия расходомера; много-лучевые ультразвуковые расходомеры; выпрямитель потока

Введение

Ультразвуковой расходомер в настоящее время становится все более популярным при использовании в измерительных узлах [1; 2]. В отличие от обычных счетчиков газа, ультразвуковые расходомеры обладают такими преимуществами, как бесконтактный режим работы, минимальные потери давления и высокая точность [3]. Принцип работы ультразвуковых расходомеров основан на вычислении времени движения в прямом и обратном направлении ультразвуковой волны, испускаемой ультразвуковым преобразователем, в рабочую среду [4]. Разница времен прохождения ультразвуковой волны в направлении по потоку и против потока позволяет вычислить скорость потока в плоскости установки ультразвуковых преобразователей [5].

При разработке ультразвуковых расходомеров, как и любых других устройств, используются допущения и упрощения, связанные с теорией ультразвуковых расходомеров [6]. Например, требуемые для коммерческого учета газа расходомеры должны иметь относительную погрешность измерения, не превышающую 0,7 %. Такую точность, согласно теории ультразвуковых расходомеров, можно получить только если поток имеет развитый турбулентный характер. Это выражается прежде всего в наличии полностью развитого профиля турбулентного течения на входе в расходомер. Любые искривления потока, связанные с наличием регуляторов давления, местных сопротивлений выше по потоку, приводят к существенному снижению точности измерительного прибора [7]. Для решения этих проблем разрабатываются специальные алгоритмы, позволяющие корректировать показания расходомера, даже если он установлен сразу после местного сопротивления, такого как одинарный или двойной отвод [8]. В работе [9; 10] используются множество лучей в различных плоскостях, вдоль которых измеряются скорости потока. Чем больше лучей, тем выше точность измерения скорости потока за счет интегрирования более точного профиля скорости. Используются также и современные методы в области нейронных сетей для прогнозирования поправочных коэффициентов расходомера, как, например, в работах [11; 12]. Для разработки подобных алгоритмов и их тестирования в лабораторных условиях необходимо проектирование соответствующих стендов, включающих систему трубопроводов с различными местными сопротивлениями. Исследователи не всегда располагают необходимым местом для разворачивания таких конструкций. Поэтому встает вопрос о разработке устройств, которые могут заменить большие участки трубопроводов с различными поворотами в роли местных сопротивлений. Например, в работе [13] описана разработка направляющего устройства с лопатками, которое позволяет формировать поток, похожий на поток после двойного отвода. А в работе [14] описано устройство для выпрямления потока и формирования полностью развитого течения на короткой дистанции после поворота трубопровода.

В настоящей работе приведены некоторые исследования, проведенные при разработке перфорированного диска, способного формировать профиль потока, аналогичный профилю после двойного отвода. А именно, в работе поставлена задача получения профиля потока в сечениях канала за перфорированным диском, качественно и количественно подобного профилю, формирующемуся при прохождении газа через двойной отвод в разных плоскостях при условии идентичных профилей скорости (полностью развитых) на входе в двойной отвод и перфорированный диск. Подобное перфорированное устройство представляет собой диск со сквозными отверстиями разного размера, специальным образом расположенными внутри диска.

Исходные данные и результаты расчета

Представленные результаты исследования влияния геометрии перфорированного диска на газодинамику и структуру потока, получены для газа метана, движущегося по трубе номинальным диаметром 500 мм со средней скоростью 17,7 м/с при числе Рейнольдса $1E7$ и полностью развитом невозмущенном профиле потока на входе в диск.

Расчеты проведены с помощью трехмерного компьютерного моделирования. На входе в расчетную область задано распределение скоростей, соответствующее полностью развитому турбулентному течению со средней скоростью потока, а также масштаб и интенсивность турбулентности в случае турбулентных режимов течения. На выходе из расчетной области использованы мягкие граничные условия с нулевым градиентом параметров потока вдоль оси канала. На стенках заданы условия прилипания. Стенки канала считаются гидравлически гладкими и адиабатическими. Среда считается несжимаемой и изотермической.

Как известно, равномерность профиля потока, пройденного через местное сопротивление в форме двойного отвода, нарушается. Поток приобретает тангенциальную составляющую скорости, т. е. закручивается. Кроме того, изменяется распределение скоростей по сечению канала. Воссоздать эти два момента и помогает перфорированный диск. Отверстия, выполненные в диске под разными углами, приводят к появлению тангенциальной составляющей скорости, т. е. закрутке потока в нужном направлении. Различный диаметр отверстий и их распределение по диску используется для формирования нужного распределения скоростей по сечению канала ниже по течению от диска.

Анализ влияния расположения отверстий, их размеров и углов наклона отверстий относительно оси диска на распределение скоростей и формирование профиля скорости ниже по течению от диска и является целью данного исследования.

Структура течения после двойного отвода

На рисунке 1 показано скалярное и векторное распределения скорости потока на выходе из двойного отвода.

На рисунке 1 а показано распределение скорости в поперечном сечении канала, отнесенной к средней скорости потока. Отчетливо видны две зоны: 1 — зоны высокой скорости и 2 — зона низкой скорости в центре сечения. На рисунке 1 б в форме векторов показана тангенциальная составляющая скорости потока, отвечающая за его закрутку. Максимум скорости расположен на периферии сечения, а также отчетливо виден центр вихря. Поток закручен в направлении по часовой стрелке. Ниже по течению от двойного отвода структура течения ввиду закрутки потока и действия сил трения деформируется. На расстоянии пяти калибров от двойного отвода распределение скоростей и закрутка потока приобретает иной вид (рис. 2).

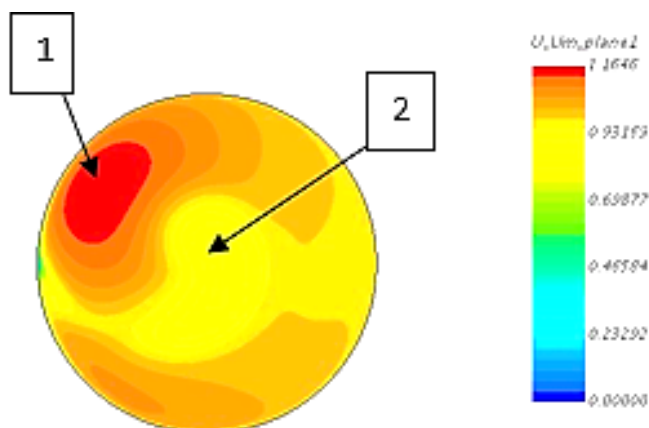


Рисунок 1 а. Скалярное поле скорости (разработано авторами)

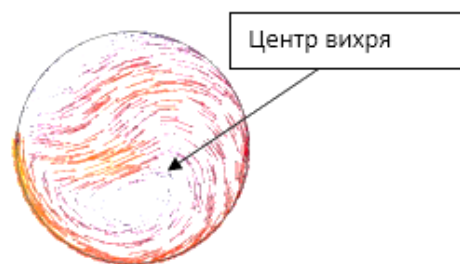


Рисунок 1 б. Векторное поле скорости (разработано авторами)

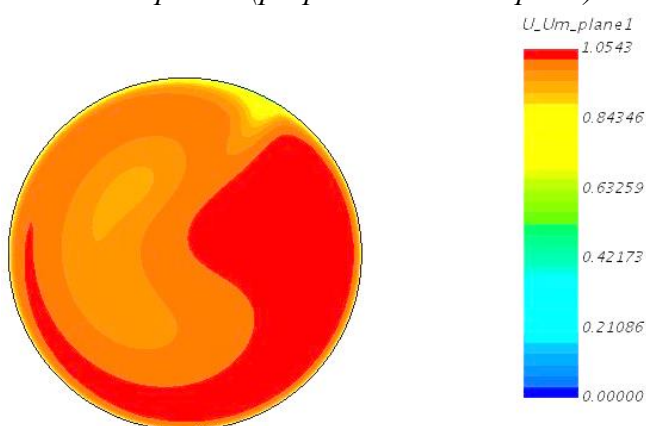


Рисунок 2 а. Скалярное поле скорости на расстоянии пяти калибров от двойного отвода (разработано авторами)

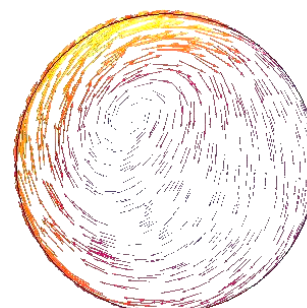


Рисунок 2 б. Векторное поле скорости на расстоянии пяти калибров от двойного отвода (разработано авторами)

Распределению скорости, показанному на рисунке 2 соответствуют профили скорости (рис. 4), снятые вдоль четырех линий (рис. 3). В данном случае интересует форма профилей, поэтому шкалы на рисунках не показаны.

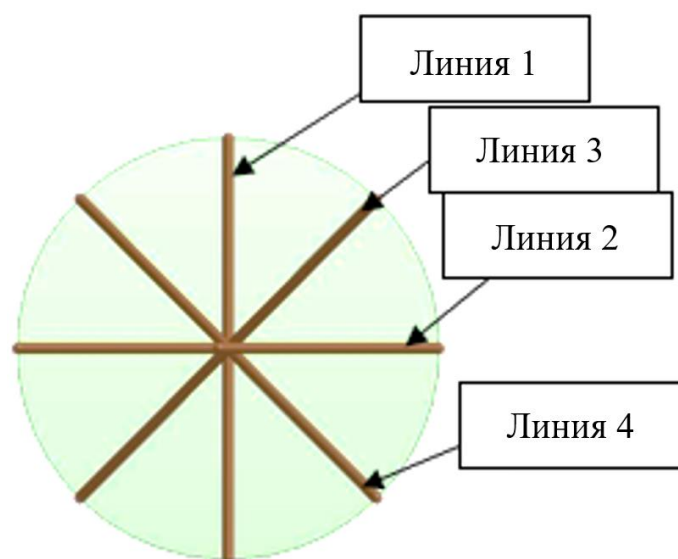
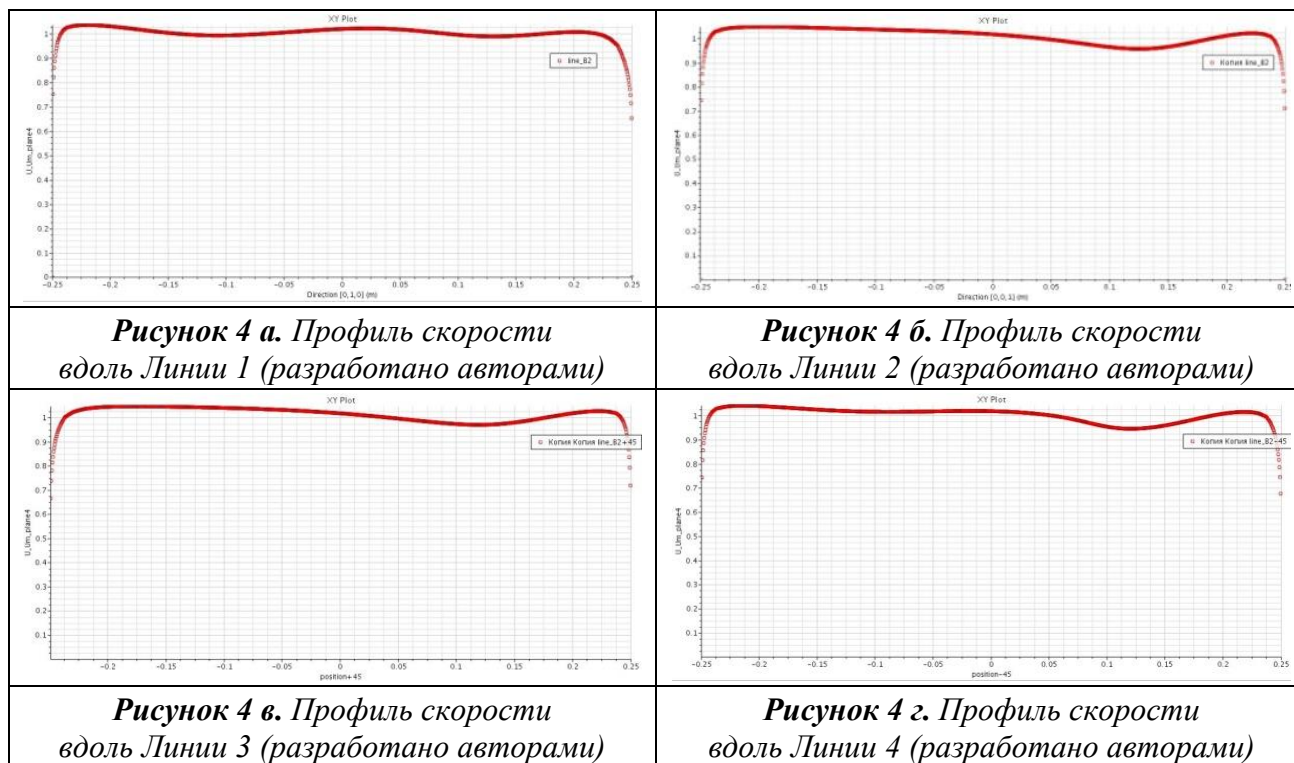


Рисунок 3. Линии, вдоль которых показаны профили скорости (разработано авторами)



Перфорированный диск. Исполнение 1. Результаты

Чтобы получить профили скорости в сечении на расстоянии пяти калибров от диска, схожие с представленными на рисунке 4, необходимо, используя набор отверстий, сформировать распределение скорости сразу после диска, аналогичное показанному на рисунке 1. А значит, отверстия можно разделить на две геометрические группы: первая группа, отвечает за формирование зоны 1 (рис. 1 а), вторая группа — за формирование зоны 2 (рис. 1 а). Очевидно, что зоны высоких скоростей могут обеспечить отверстия малого диаметра и, напротив, зону низких скоростей могут обеспечить отверстия большего диаметра. На рисунке 5 показана геометрия перфорированного диска с отверстиями, построенными по описанной выше логике.

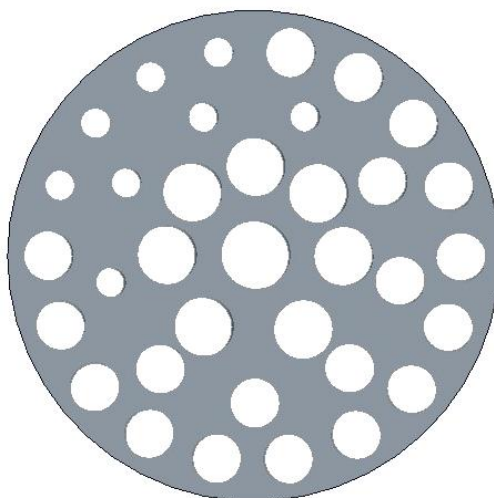


Рисунок 5. Перфорированный диск исполнения 1 (разработано авторами)

Таким образом, представленное распределение отверстий должно сформировать требуемое распределение скорости. Необходимую закрутку потока и формирование тангенциальной составляющей скорости должна обеспечить специальная ориентация отверстий в том направлении, в котором направлены главные вектора скорости в сечении на выходе из двойного отвода. Под ориентацией понимается совокупность углов, под которыми расположены отверстия относительно оси трубы. Углы α , β , γ (углы между осью отверстия и осями декартовой системы координат с центром в центре отверстия) получены в результате компьютерного моделирования течения через двойной отвод. Имея три составляющих скорости в декартовой системе координат, а также главный вектор скорости, можно получить направляющие косинусы в каждой точке интересующего сечения, а значит и углы наклона главного вектора скорости по отношению к трем осям декартовой системы координат. На рис. 6 показаны направления отверстий.

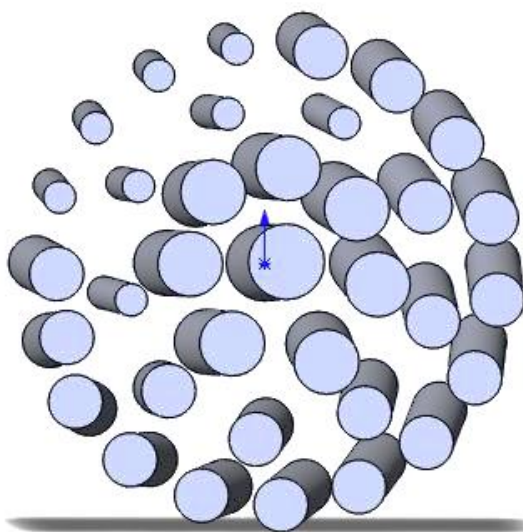


Рисунок 6. Направление отверстий перфорированного диска (разработано авторами)

Ниже показана деформация потока при проходе через представленный перфорированный диск.

Как видно из приведенных полей скорости в разных поперечных сечениях канала, отверстия малого диаметра должны были увеличивать скорость потока в локальной зоне 1, а крупные отверстия наоборот — уменьшать в зоне 2.

Но профиль потока начинает деформироваться уже на некотором расстоянии до диска (рис. 7 б).

Причем скорости в зоне 1 вследствие большого перекрытия проходного сечения начинают уменьшаться, т. е. поток в этой области тормозиться быстрее, чем в центральной. Таким образом, в отверстия малого диаметра, которые должны разгонять поток сверх скоростей центральной зоны 2, поступает поток со скоростями, значительно меньшими (рис. 7 в), чем скорости в этой области при полностью развитом профиле.

По этой причине не удастся получить требуемое распределение скоростей в сечении на выходе из диска (рис. 7 е).

Вследствие этого, развивающийся поток при прохождении через диск приобретает структуру, отличную от требуемой.

На рисунок 8 показаны скалярные и векторные поля скорости в сечении на расстоянии пяти калибров от диска.

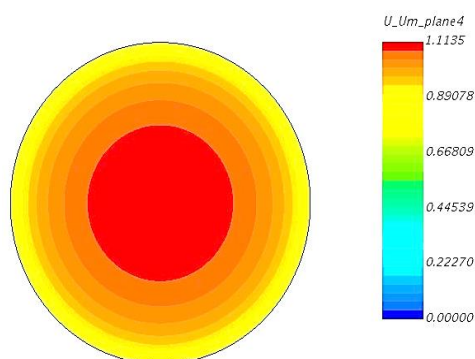


Рисунок 7 а. Полностью развитый поток в канале (разработано авторами)

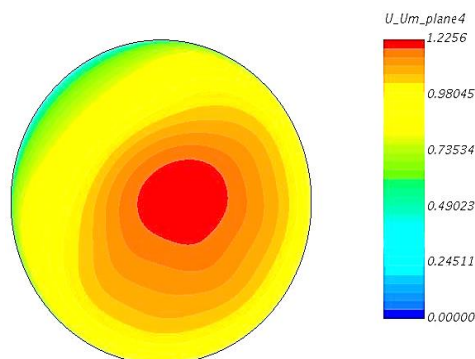


Рисунок 7 б. Структура потока за 0,1 м до диска (разработано авторами)

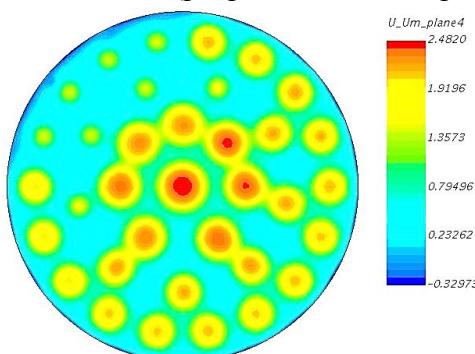


Рисунок 7 в. Структура потока за 0,01 м до диска (разработано авторами)

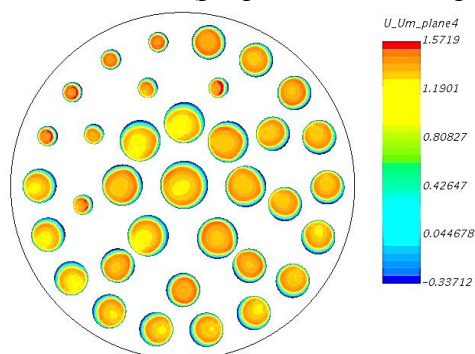


Рисунок 7 г. Структура потока внутри диска 0,01 м (разработано авторами)

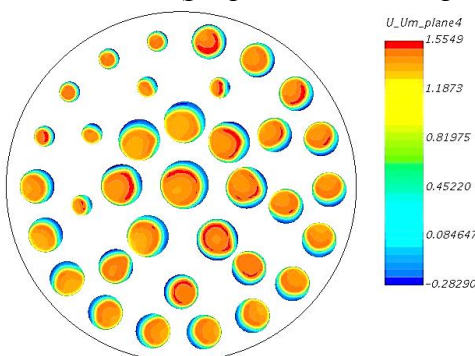


Рисунок 7 д. Структура потока внутри диска 0,02 м (разработано авторами)

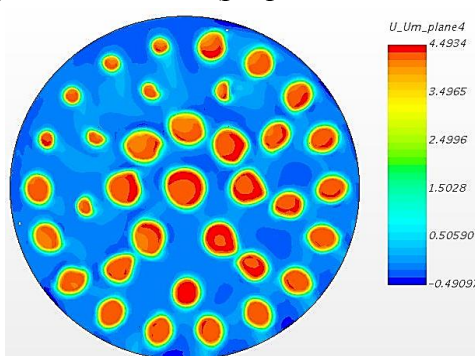


Рисунок 7 е. Структура потока на выходе из диска (разработано авторами)

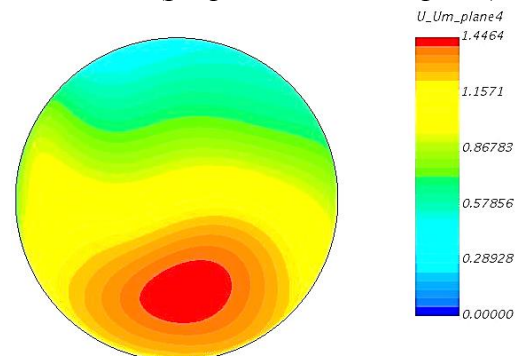


Рисунок 8 а. Скалярное поле скорости в сечении на расстоянии пяти калибров от диска толщиной 25 мм (разработано авторами)

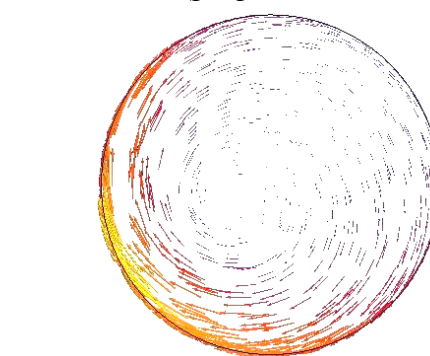


Рисунок 8 б. Векторное поле скорости в сечении на расстоянии пяти калибров от диска толщиной 25 мм (разработано авторами)

Распределение скорости на рисунке 8 а и качественно и количественно существенно отличается от картины течения, показанной на рисунке 2 а. При этом векторное распределение тангенциальной составляющей скорости (рис. 8 б) количественно и качественно схоже, за исключением места расположения центра вихря.

На рисунках 8 в и 8 г показаны скалярное и векторное поля скорости в сечении на расстоянии восьми калибров от диска.

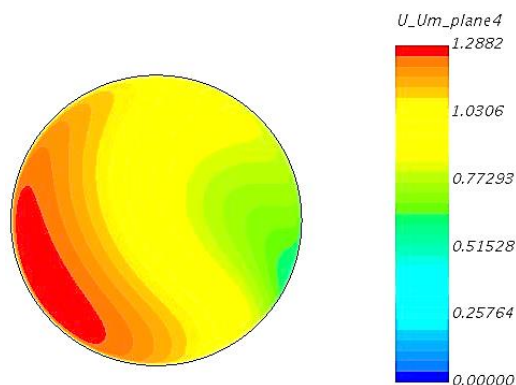


Рисунок 8 в. Скалярное поле осевой скорости за диском толщиной 25 мм (разработано авторами)

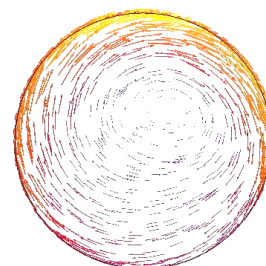


Рисунок 8 г. Векторное поле тангенциальной скорости за диском толщиной 25 мм (разработано авторами)

Поле тангенциальной скорости количественно и качественно подобно картине, формирующейся после двойного отвода, но распределение осевой скорости по-прежнему качественно отличается от картины течения после двойного отвода. В результате проведенных исследований выявлен третий фактор, влияющий на структуру потока, а именно — на величину тангенциальной скорости потока.

Ниже представлены векторные поля тангенциальной скорости в сечении на расстоянии 5 калибров от диска, полученные при разной толщине перфорированного диска.

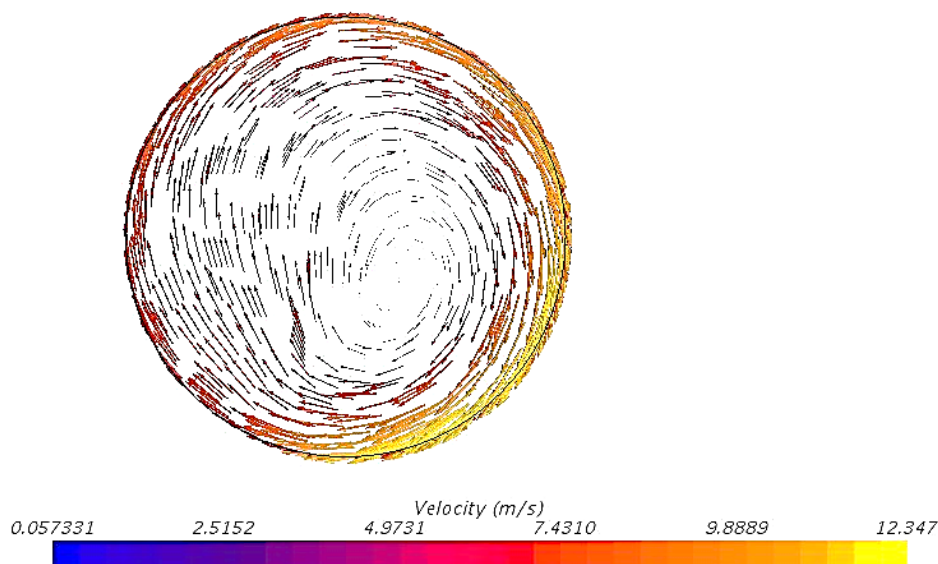


Рисунок 9 а. Векторное поле скорости при толщине диска 50 мм (разработано авторами)

Из рисунка 9 видно, что при увеличении толщины диска растут значения тангенциальной составляющей скорости и поток становится более закрученным: при толщине 10 мм — максимум тангенциальной скорости 1,66 м/с, при толщине 25 мм — 5 м/с, при толщине 50 мм — 12,3 м/с.

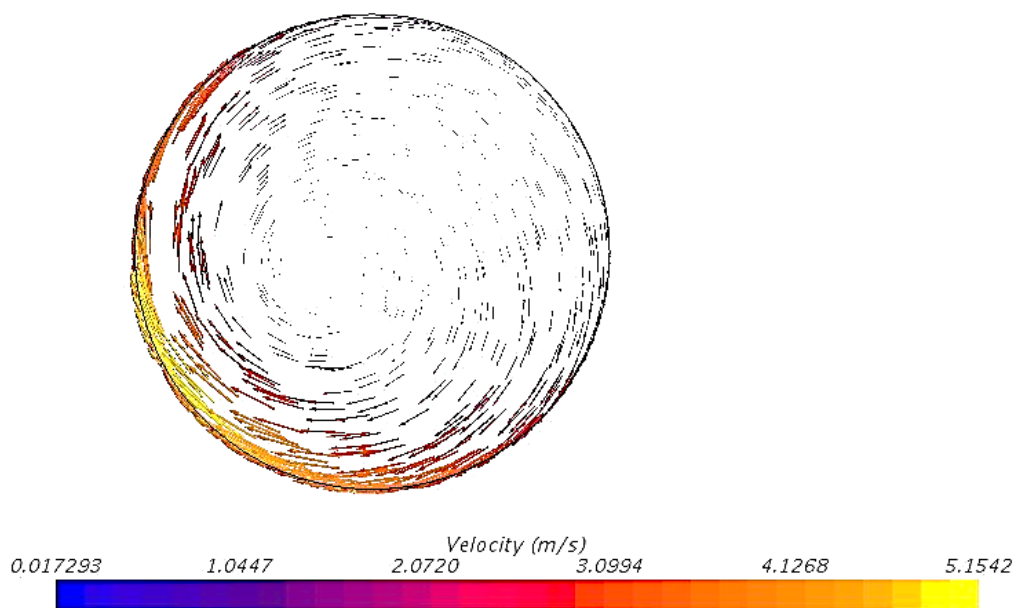


Рисунок 9 б. Векторное поле скорости
при толщине диска 25 мм (разработано авторами)

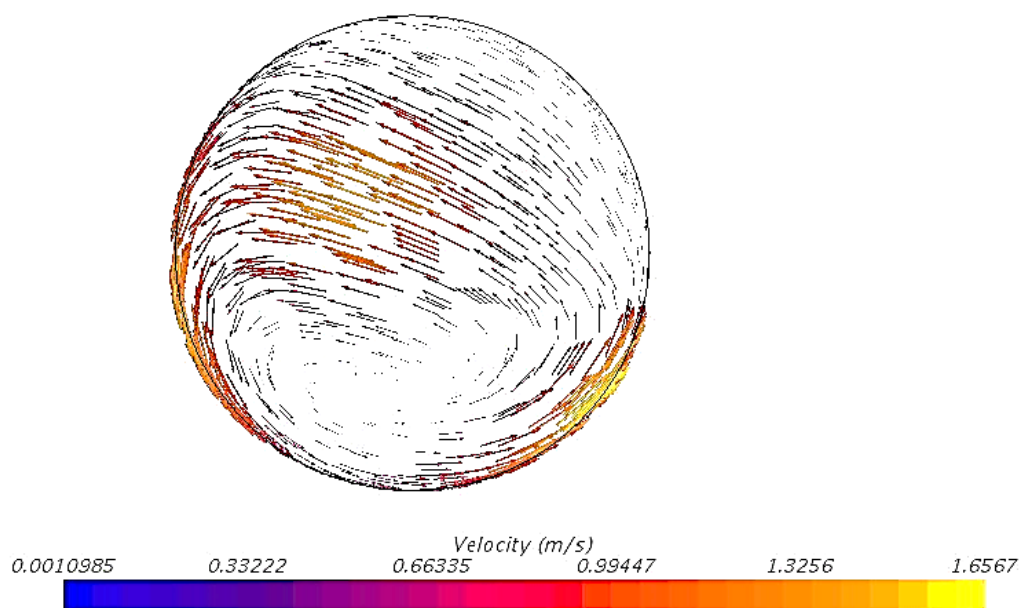


Рисунок 9 в. Векторное поле скорости
при толщине диска 10 мм (разработано авторами)

Значение максимума тангенциальной скорости на расстоянии пяти калибров после двойного отвода составляет 5,6 м/с.

Можно сделать вывод о том, что толщина диска, равная 25 мм, является наиболее оптимальной при текущем исполнении диска для решения поставленной задачи.

Существенное влияние на результат работы перфорированного диска оказывает также форма профиля потока на его входе.

На рисунке 10 показаны скалярные поля скорости для двух вариантов условий на входе в диск.

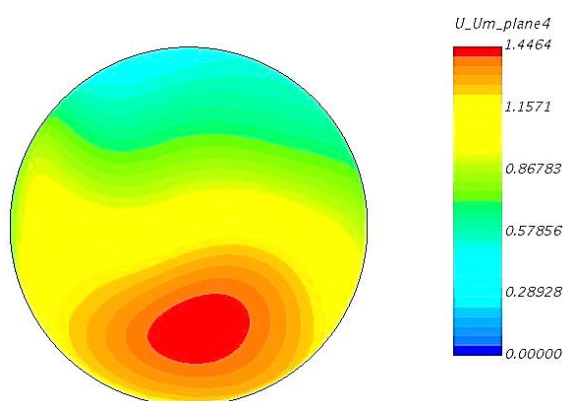


Рисунок 10 а. На входе в диск полностью развитый профиль скорости (разработано авторами)

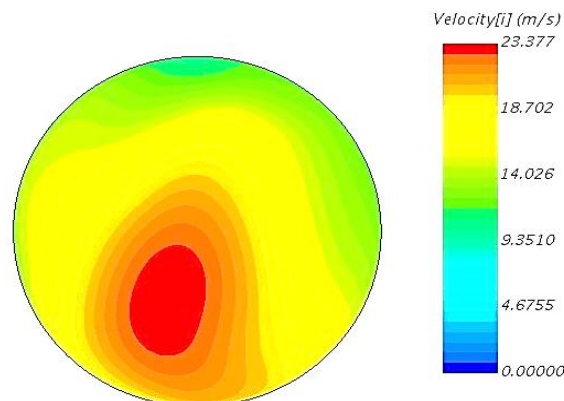


Рисунок 10 б. На входе в диск прямой (постоянный по сечению) профиль скорости (разработано авторами)

Таким образом, вследствие высокой чувствительности диска к входным условиям потока, а самого потока к расположению отверстий диска при приближении к нему, на данный момент оказалось затруднительным спрогнозировать необходимое распределение и размер отверстий для получения нужного профиля потока. Но выявлены основные факторы и принципы, влияющие на формирование течения за диском.

Перфорированный диск. Исполнение 2

Также был проведен анализ взаимодействия потока с перфорированным диском, выполненным в другом концепте [15].

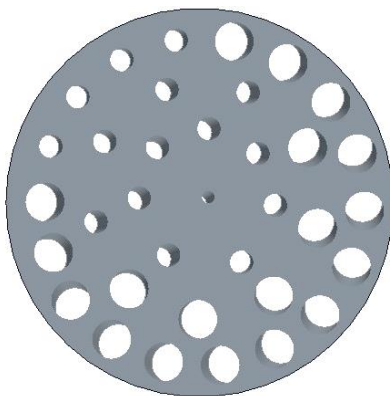


Рисунок 11. Перфорированный диск исполнения 2 (разработано авторами)

На рисунке 11 показана модель такого диска.

Ниже представлены результаты моделирования течения сквозь этот диск при толщине 25 мм.

Как видно из рисунка 12 изменение отверстий повлекло за собой изменение структуры течения ниже по потоку от диска относительно первого варианта исполнения (рис. 5). При этом, в данном случае толщина диска 25 мм количественно уже не обеспечивает необходимые тангенциальные скорости (максимум скорости составил 10 м/с). Можно сделать вывод о том, что каждому варианту набора отверстий соответствует своя, «правильная», толщина диска, которую можно спрогнозировать только методом подбора и модельных исследований.

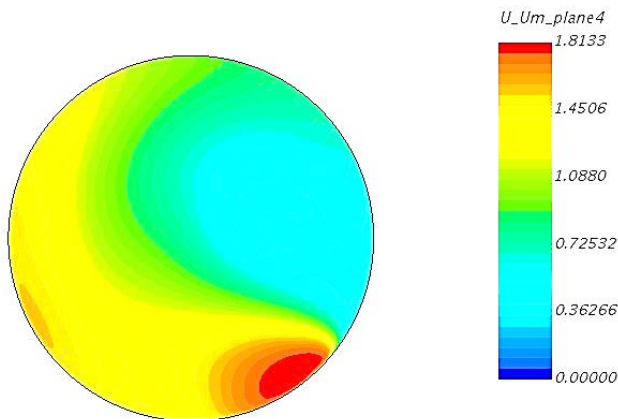


Рисунок 12 а. Скалярное поле осевой скорости в сечении на расстоянии пяти калибров после диска исполнения 2 (разработано авторами)

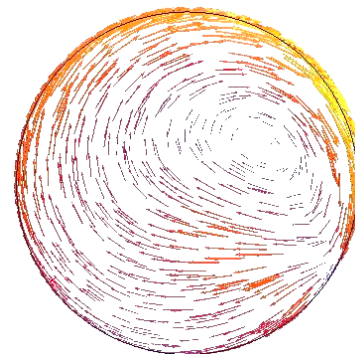


Рисунок 12 б. Векторное поле тангенциальной скорости в сечении на расстоянии 5 калибров после диска исполнения 2 (разработано авторами)

Перфорированный диск. Исполнение 3

Как видно из рисунка 7, отверстия малого диаметра в силу большого перекрытия сечения канала оказывают замедляющее влияние на поток вверх по течению. В результате чего не удастся добиться необходимой структуры потока в зоне 1 и зоне 2 (рис. 1 а). Поэтому предложен обратный вариант реализации конструкции перфорированного диска. Предлагается формировать зоны высоких (зона 1) и низких (зона 2) скоростей при приближении потока к диску. Сделать это можно путем изменения диаметра отверстий с малого на большой в зоне 1. Таким образом, ниже рассмотрен третий вариант конструкции диска (рис. 13).

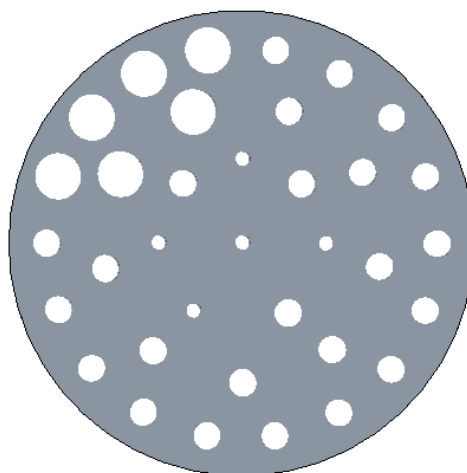


Рисунок 13. Перфорированный диск толщиной 7 мм. Вариант исполнения 3 (разработано авторами)

В результате влияния диска, поток выше по течению начинает деформироваться вблизи диска (рис. 14 а). Появляется характерная зона высоких скоростей (зона 1), которая ниже по течению от диска начинает развиваться и деформироваться. На рисунке 14 в показаны контуры, схожие с представленными на рисунке 1 а (поле скорости после двойного отвода). В сечении четырех калибров после диска эти контуры еще более схожи с картиной течения после двойного отвода. Ярко выражены контуры зон высокой и низкой скорости. В сечении пяти калибров (рис. 14 д) картина, напротив, не соответствует требуемой даже приблизительно.

Если отследить дальнейшее развитие потока вниз по течению от диска, можно выявить сечение, расположенное на удалении 4,4 м от диска — приблизительно восемь калибров (рис. 15). В этом сечении структура потока вновь напоминает картину течения после двойного отвода, показанную на рисунке 2 а.

Необходимо отметить, что изменение диаметров отверстий в зоне 1 с малых на большие привело к изменению направления закрутки потока (с направления «по часовой» стрелки на направление «против часовой» стрелки).

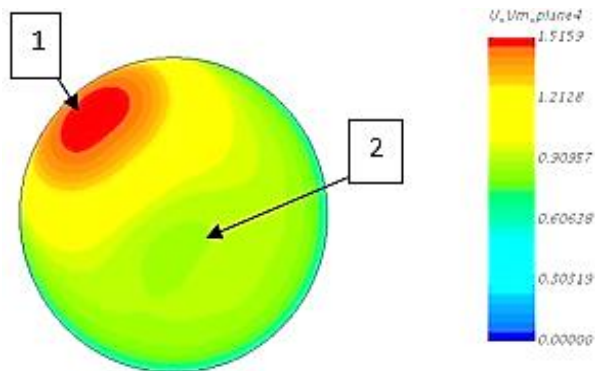


Рисунок 14 а. Структура потока.
0,1 м до диска (разработано авторами)

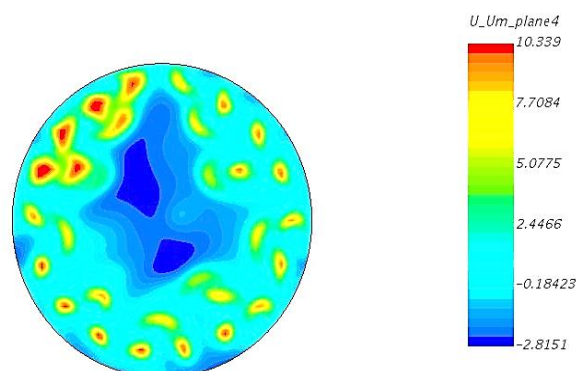


Рисунок 14 б. Структура потока.
0,1 м после диска (разработано авторами)

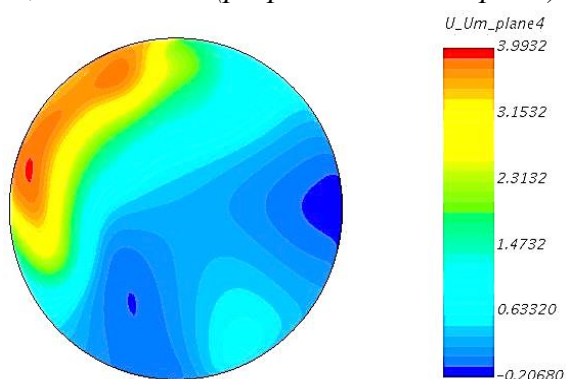


Рисунок 14 в. Структура потока.
0,8 м после диска (разработано авторами)

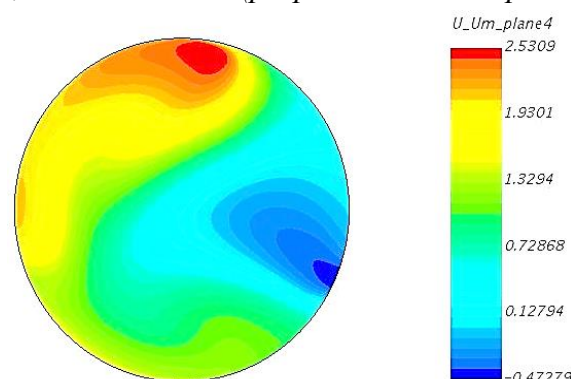


Рисунок 14 г. Структура потока.
2 м после диска (разработано авторами)

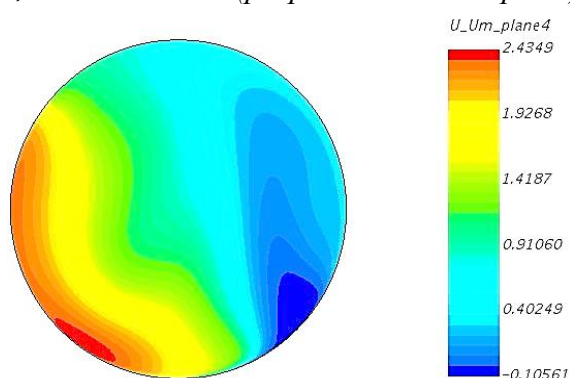


Рисунок 14 д. Структура потока.
5 калибров после диска. Скалярное поле
(разработано авторами)

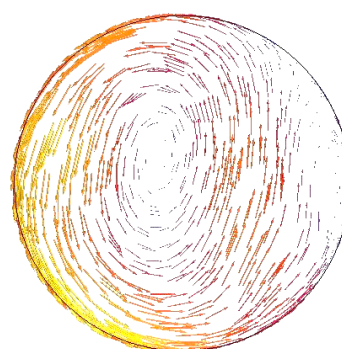


Рисунок 14 е. Структура потока.
5 калибров после диска. Поле векторов
(разработано авторами)

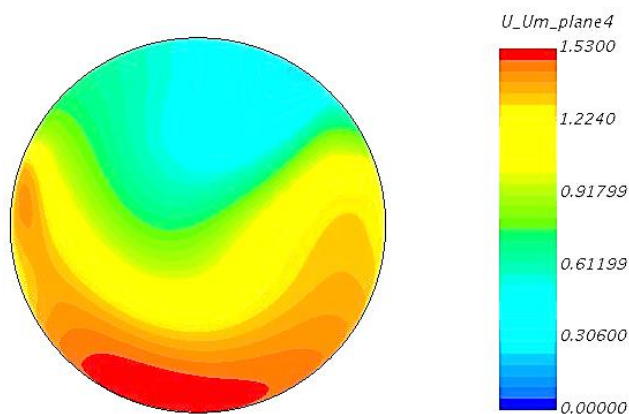


Рисунок 15 а. Структура потока.
4,4 м после диска (разработано авторами)

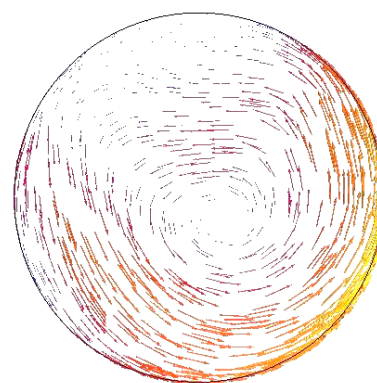


Рисунок 15 б. Структура потока.
4,4 м после диска. Поле векторов
(разработано авторами)

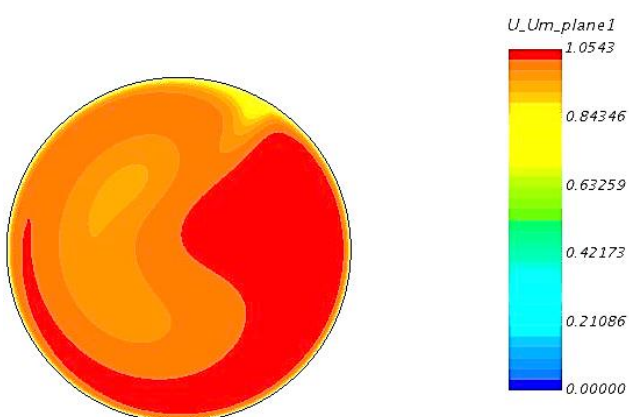


Рисунок 15 в. Структура потока.
5 калибров после двойного отвода
(разработано авторами)

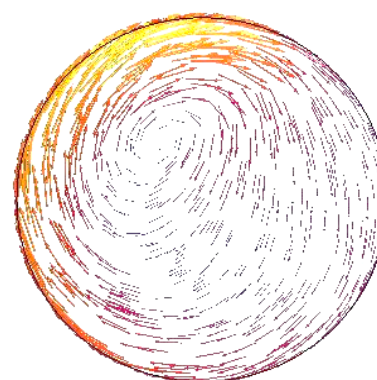


Рисунок 15 г. Структура потока.
5 калибров после двойного отвода. Поле
векторов (разработано авторами)

Ниже на рисунке 16 приведены профили скорости в сечении, расположенном на удалении 4,4 м от диска вниз по потоку, а на рисунках 17 а–17 б показаны профили скорости после диска исполнения 2, полученной авторами с неизвестной нам толщиной диска и числе Рейнольдса в работе [15], качественно и количественно согласующиеся профилями после двойного отвода [15]. Можно сделать вывод, что реализовать эффективно работающую конструкцию авторов статьи [15] без известной толщины диска и режима течения не представляется возможным, но можно подобрать сечения, где профили скорости все же будут качественно и количественно подобны показанным на рисунках 17 а–17 б.

Как видно из рисунка 15 б, полученные максимальные значения тангенциальной составляющей скорости почти в 2 раза превышают максимальную тангенциальную скорость потока после двойного отвода. Поэтому далее был рассмотрен перфорированный диск исполнения 3 толщиной 2 мм. Ниже представлены результаты моделирования взаимодействия потока газа с этим диском. Результаты относятся к сечению, расположенном на удалении 3,9 м от диска.

На рисунке 18 б в форме векторного поля скорости показана тангенциальная составляющая скорости, максимальное значение которой примерно 5,6 м/с, что количественно хорошо согласуется с результатами, полученными после двойного отвода (рис. 15 г). Но направление вращения — против часовой стрелки.

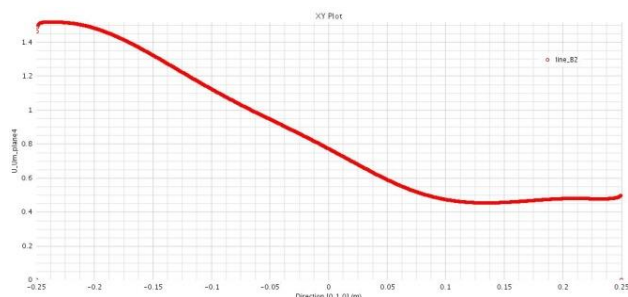


Рисунок 16 а. Профиль скорости вдоль Линии 1 (разработано авторами)

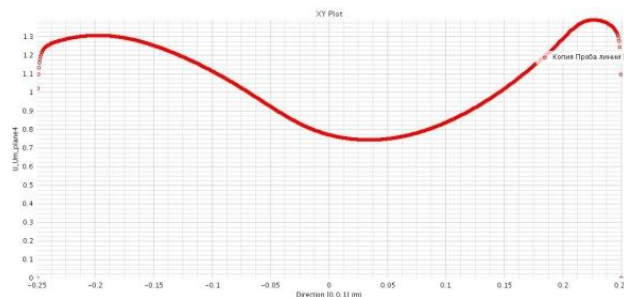


Рисунок 16 б. Профиль скорости вдоль Линии 2 (разработано авторами)

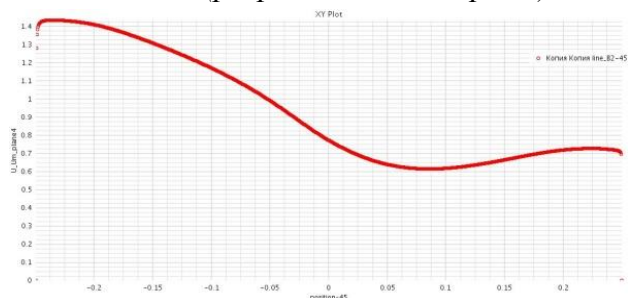


Рисунок 16 в. Профиль скорости вдоль Линии 3 (разработано авторами)

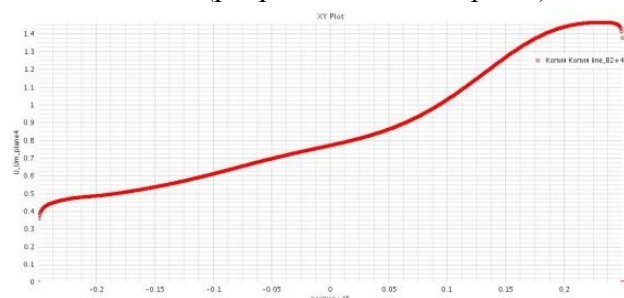


Рисунок 16 г. Профиль скорости вдоль Линии 4 (разработано авторами)

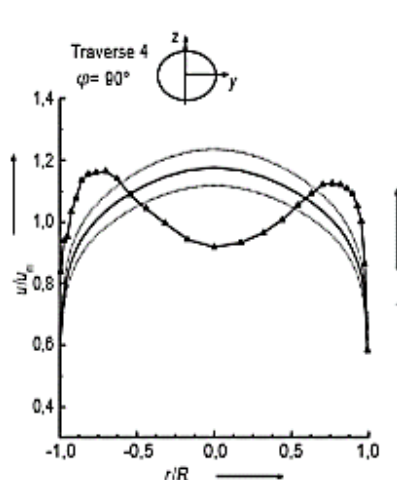
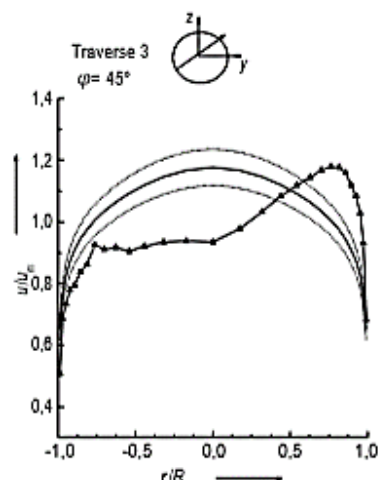
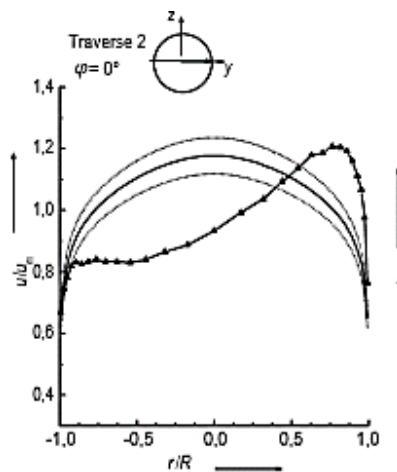
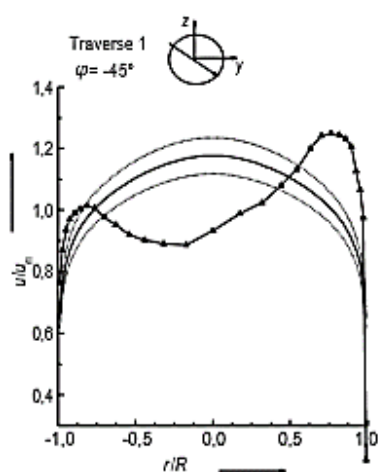


Рисунок 17 а. Профили осевой скорости в сечении 5 калибров после диска, описанного в [15] (рисунки принадлежат Gabriel Moniz Pereira, Bodo Mickan, Rainer Kramer, Dietrich Dopheide)

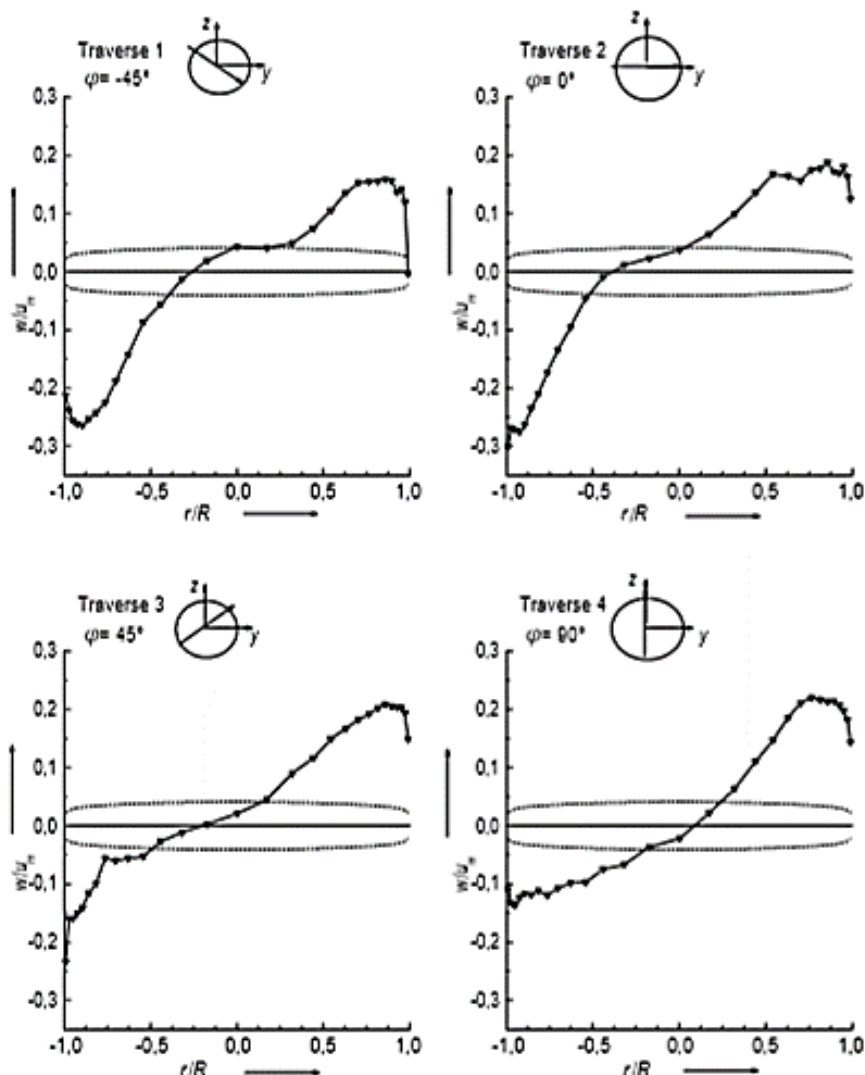


Рисунок 17 б. Профили тангенциальной скорости в сечении пяти калибров после диска, описанного в [15] (рисунки принадлежат Gabriel Moniz Pereira, Bodo Mickan, Rainer Kramer, Dietrich Dopheide)

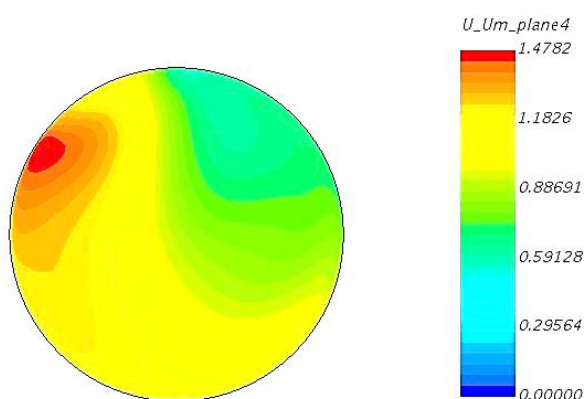


Рисунок 18 а. Структура потока.
3,9 м после диска (разработано авторами)

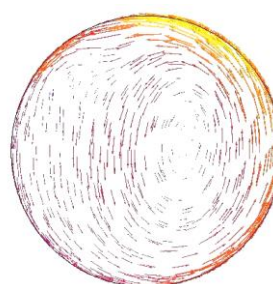


Рисунок 18 б. Структура потока.
3,9 м после диска. Поле векторов
(разработано авторами)

Выявленные тонкости и описанные принципы проектирования позволили разработать выпрямители и формирователи потока на основе перфорированных дисков. Кроме озвученных факторов, влияющих на структуру потока после перфорированного диска, выявлен следующий

важный момент. Авторы настоящей статье пришли к выводу, что наиболее оптимальным вариантом при проектировании формирователя потока является строгий двухэтапный подход. На первом этапе на основе описанных принципов и рассуждений разрабатывается выпрямитель потока, способный трансформировать искривленный профиль в полностью развитый и не искажающий полностью развитый поток, проходящий через него. А затем, на основе количества и размеров отверстий выпрямителя проводится проектирование формирователя потока за счет поворота отверстий по направляющим косинусам, которые вычислялись на основе результатов моделирования течения после двойного отвода.

Разработанные образцы дисков

Ниже показаны два варианта исполнения дисков, позволяющих получать достаточно точные профили скорости потока после диска, качественно и количественно совпадающие с профилями после двойного отвода. А также, два варианта выпрямителей потока, позволяющих получать полностью развитые профили потока после диска.

На рисунках 19 а–19 в показаны перфорированные диски с малым количеством отверстий.

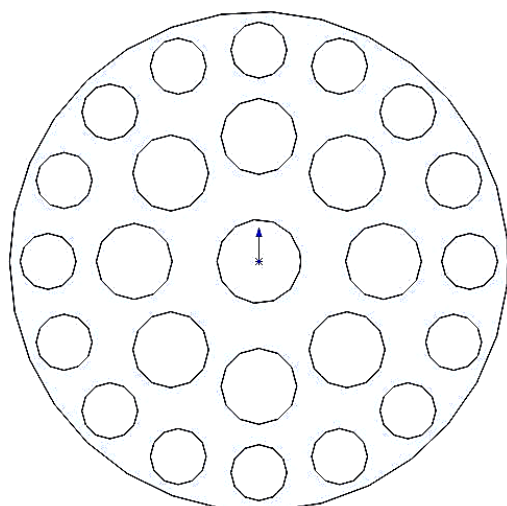


Рисунок 19 а. Выпрямитель профиля потока (разработано авторами)

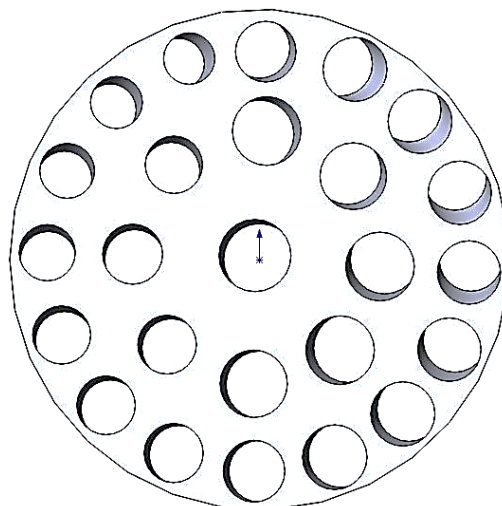


Рисунок 19 б. Формирователь профиля потока (разработано авторами)

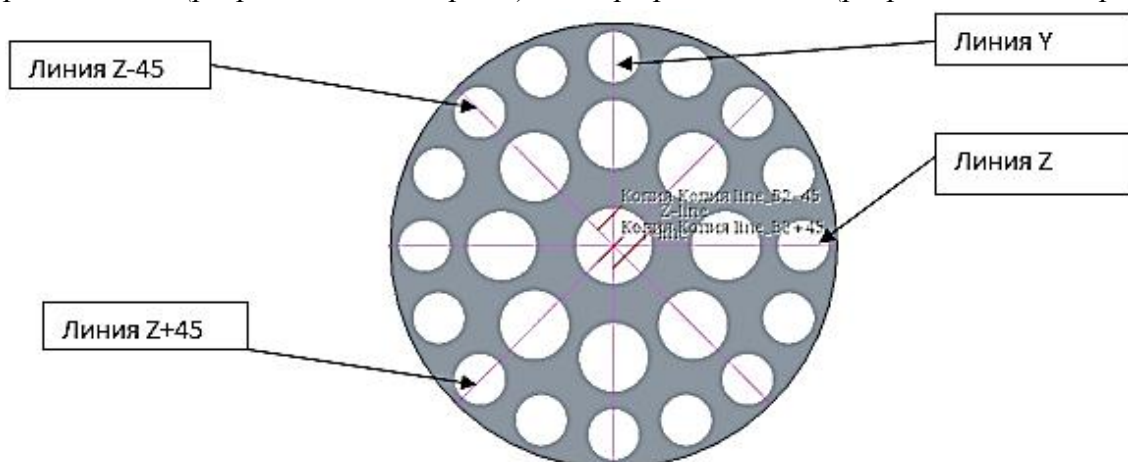
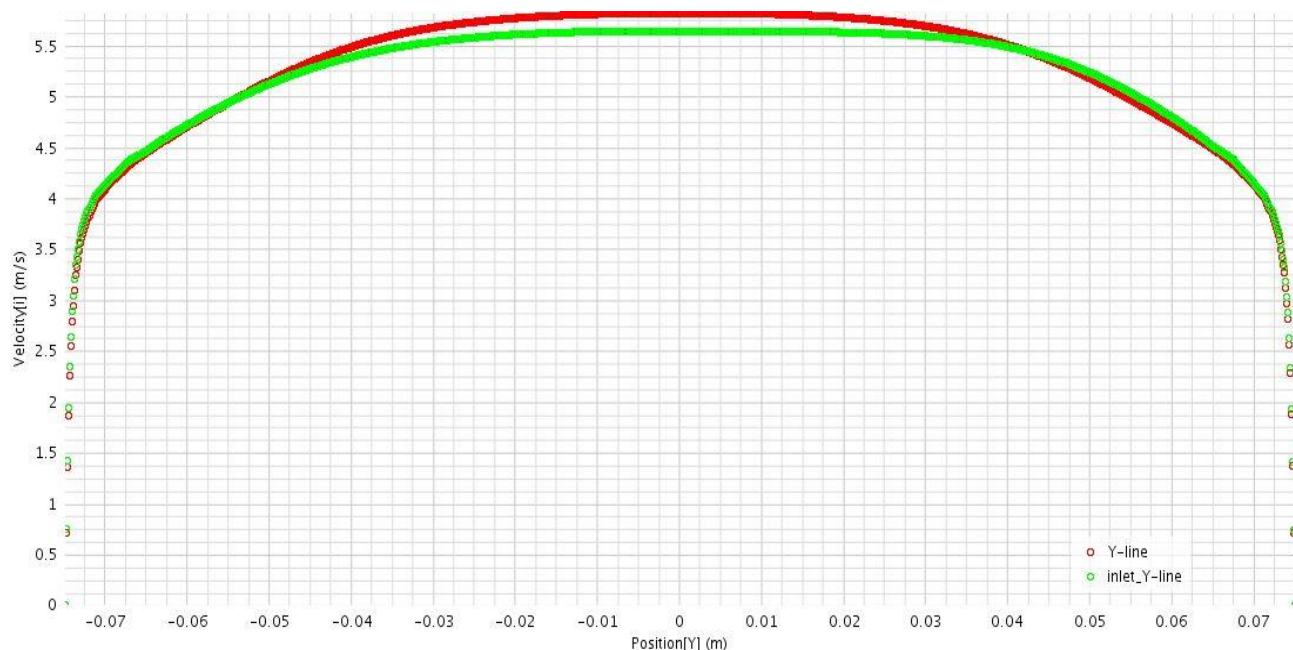


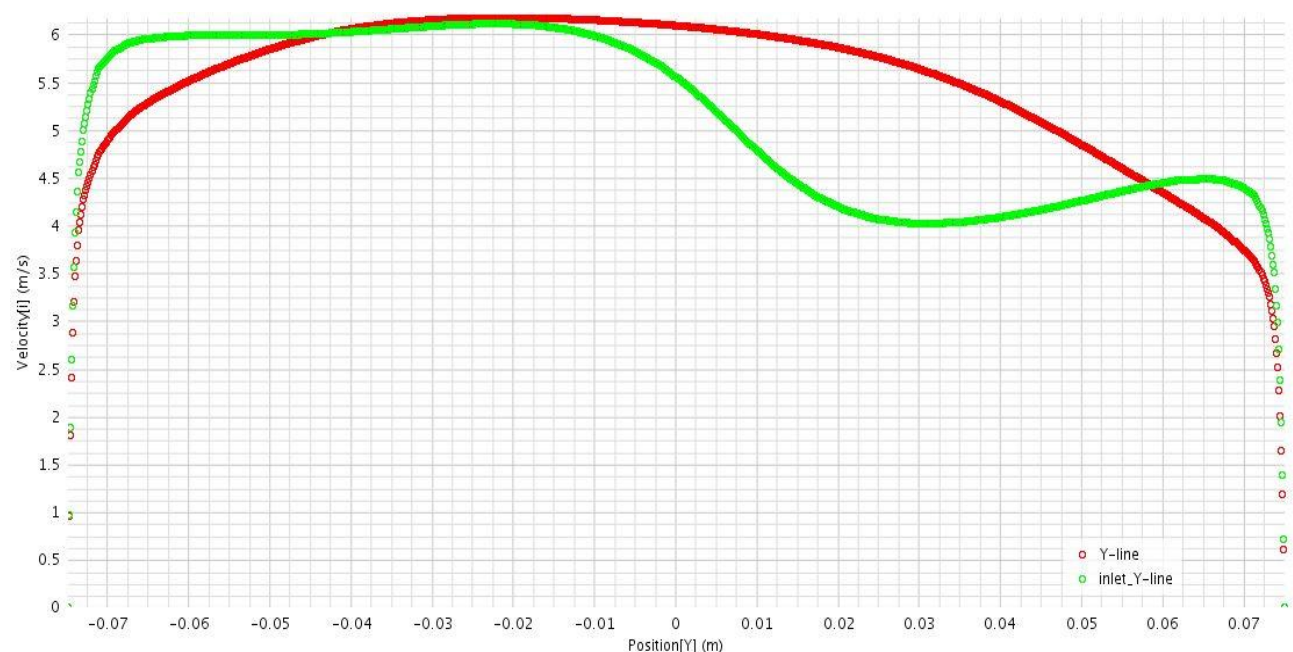
Рисунок 20 в. Линии, вдоль которых построены профили потока (разработано авторами)

Результат работы выпрямителя потока показан на рисунках 21 а–21 б. В одном случае (рис. 21 а) на вход выпрямителя подан поток с полностью развитым профилем скорости. Это сделано для демонстрации отсутствия какого-либо существенного влияния диска на такой профиль. Во втором случае (рис. 21 б) на вход диска подан профиль после двойного отвода и показан результат работы выпрямителя.



Зеленая кривая — профиль скорости до диска; красная кривая — профиль скорости после диска

Рисунок 21 а. Полностью развитый профиль до диска и после диска в сечении 3 калибра (разработано авторами)



Зеленая кривая — профиль скорости до диска; красная кривая — профиль скорости после диска

Рисунок 21 б. Профиль после двойного отвода на входе в выпрямитель и полностью развитый профиль в сечении 3 калибра после выпрямителя (разработано авторами)

Результаты работы формирователя потока показаны на рисунках 22–26.

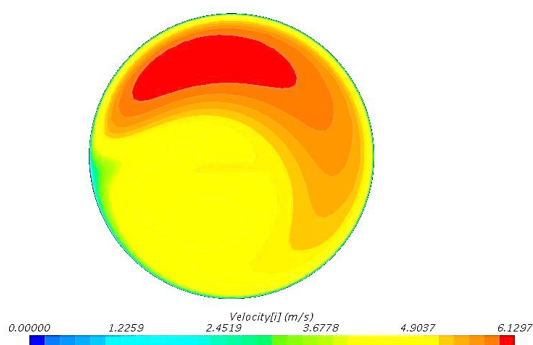


Рисунок 22 а. Скалярное поле осевой скорости после двойного отвода. Сечение 8,7 калибров (разработано авторами)

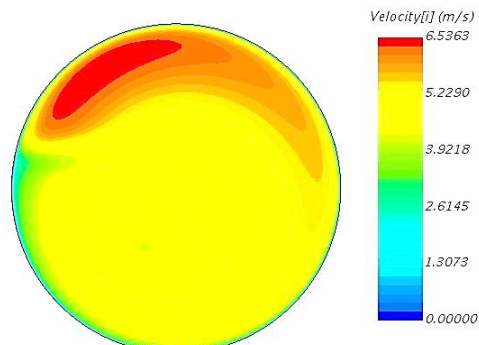


Рисунок 22 б. Скалярное поле осевой скорости после формирователя потока. Сечение 8,7 калибров (разработано авторами)

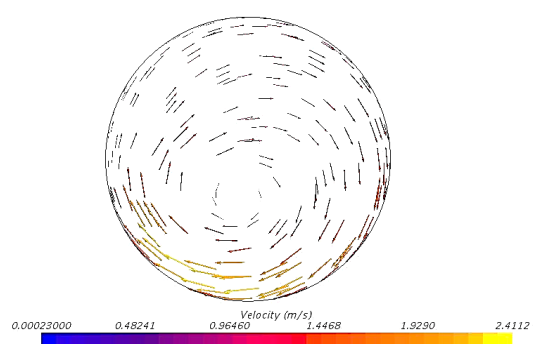


Рисунок 22 в. Векторное поле осевой скорости после двойного отвода. Сечение 8,7 калибров (разработано авторами)

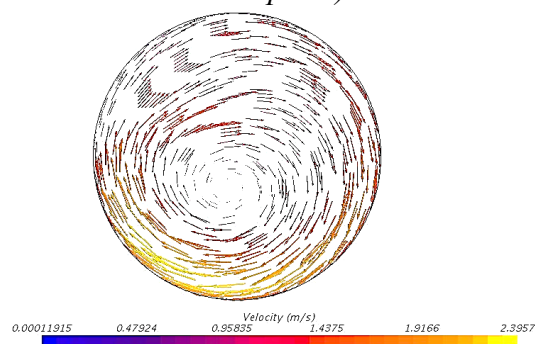
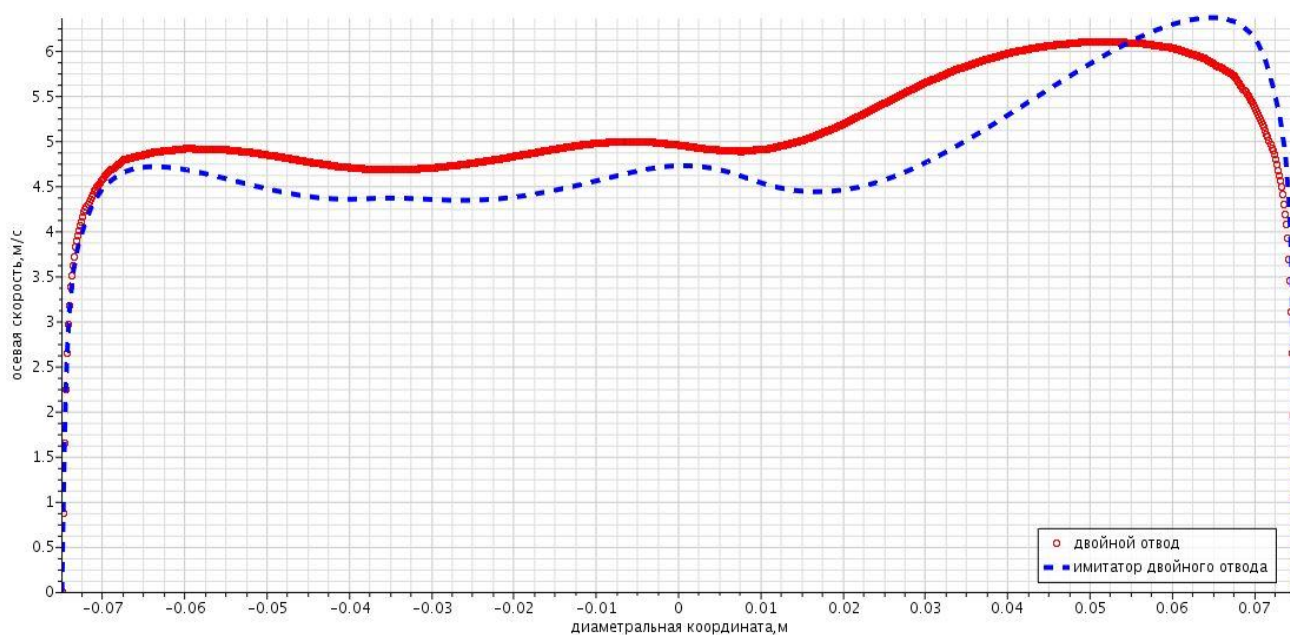


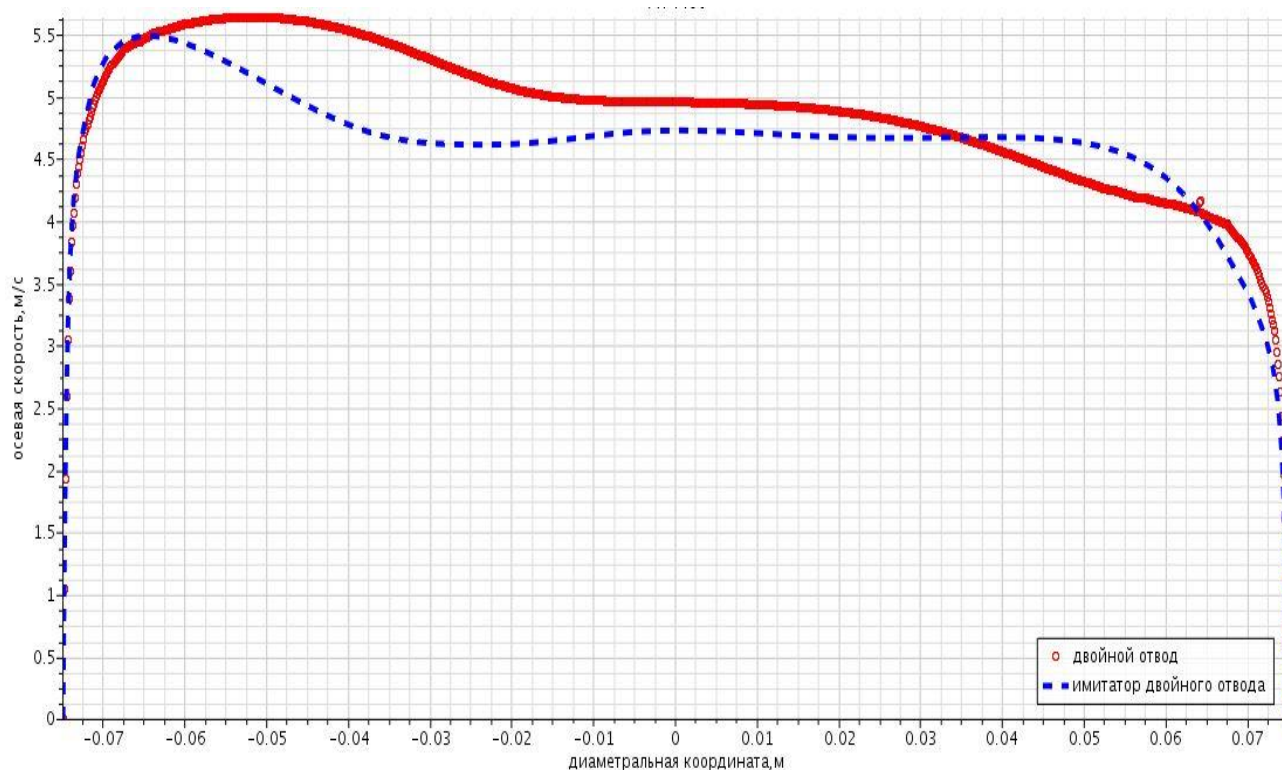
Рисунок 22 г. Векторное поле осевой скорости после формирователя потока. Сечение 8,7 калибров (разработано авторами)

Ниже на рисунке 23 показано сравнение профилей скорости.



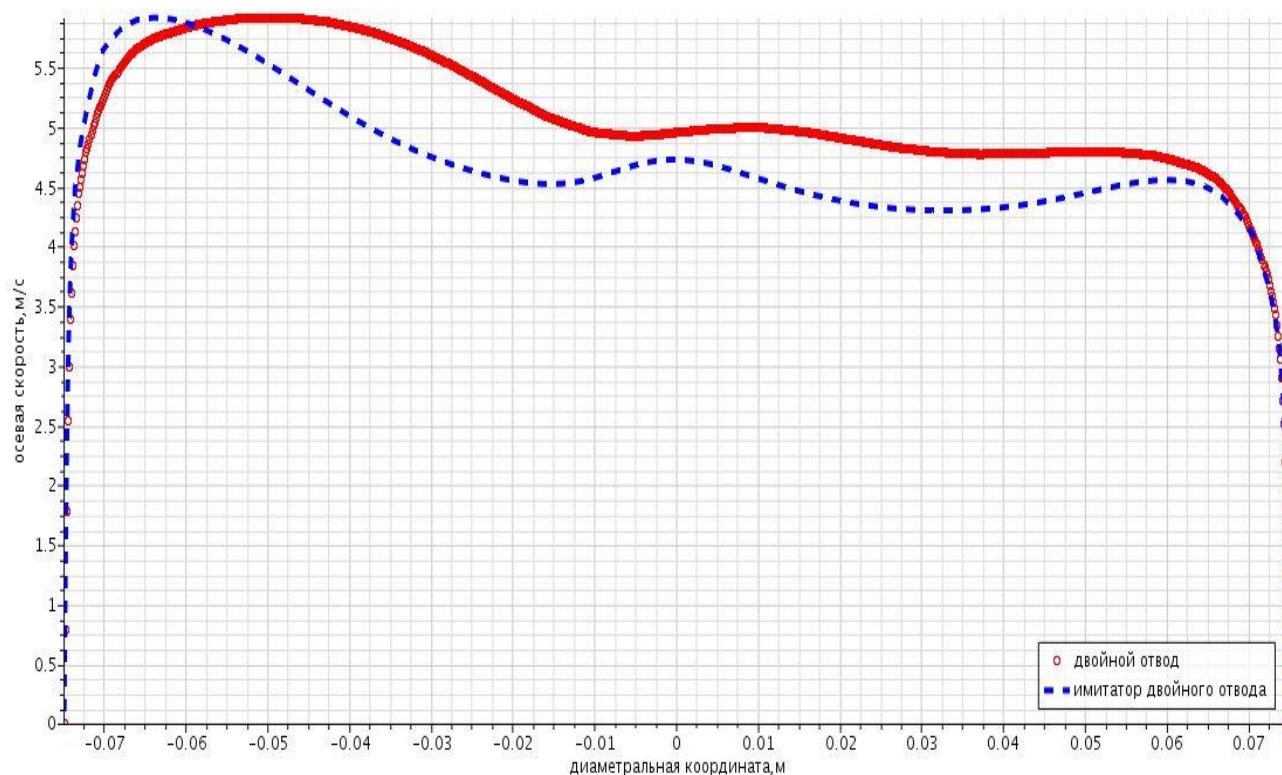
Красная кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после формирователя потока

Рисунок 23. Профиль скорости вдоль Линия Y (разработано авторами)



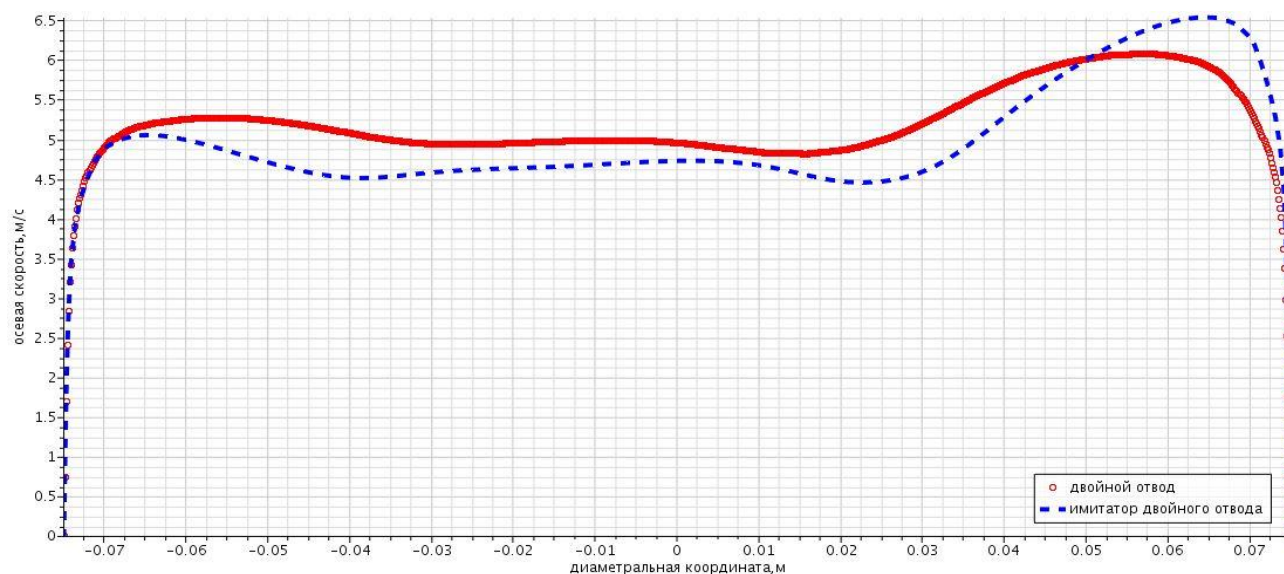
Красная кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после формирователя потока

Рисунок 24. Профиль скорости вдоль Линия Z (разработано авторами)



Красная кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после формирователя потока

Рисунок 25. Профиль скорости вдоль Линия Z+45 (разработано авторами)



Красная кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8,7 калибров после формирователя потока

Рисунок 26. Профиль скорости вдоль Линия Z-45 (разработано авторами)

На рисунке 27 показаны перфорированные диски с большим количеством отверстий.

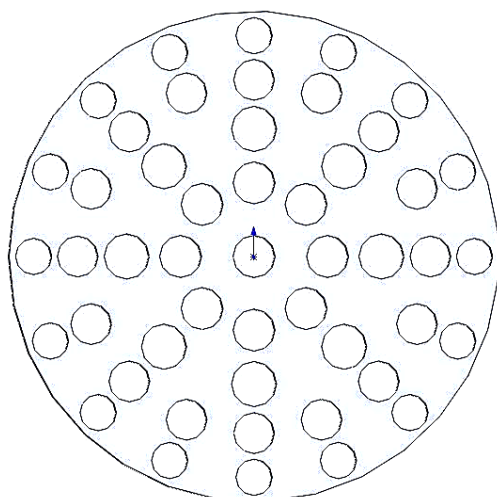


Рисунок 27 а. Выпрямитель
профиля потока (разработано авторами)

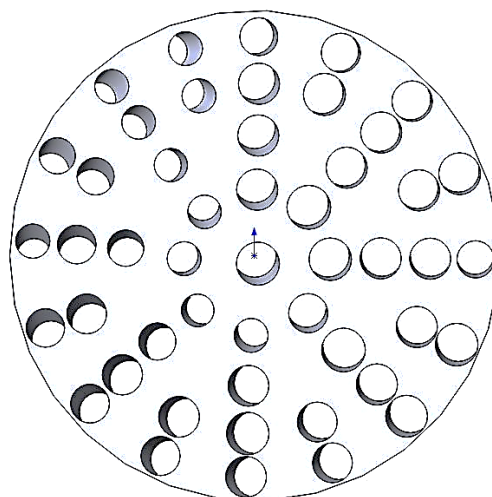


Рисунок 27 б. Формирователь
профиля потока (разработано авторами)

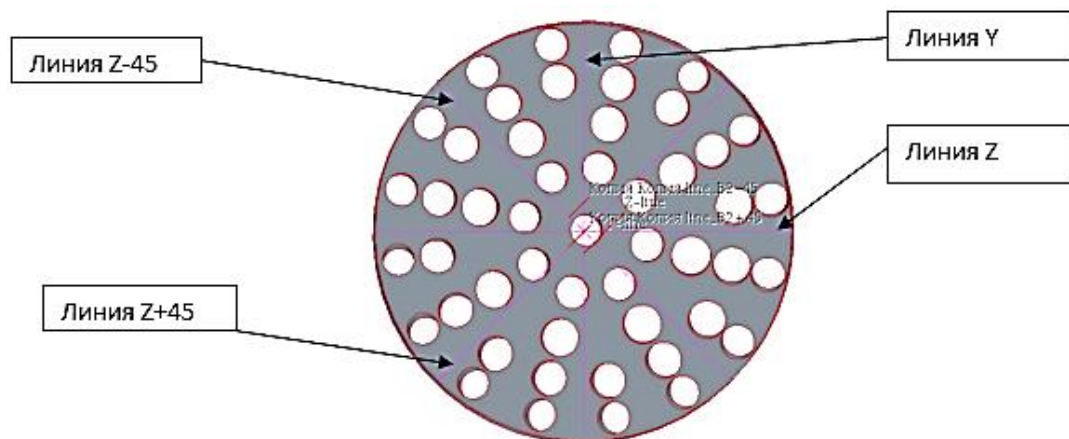
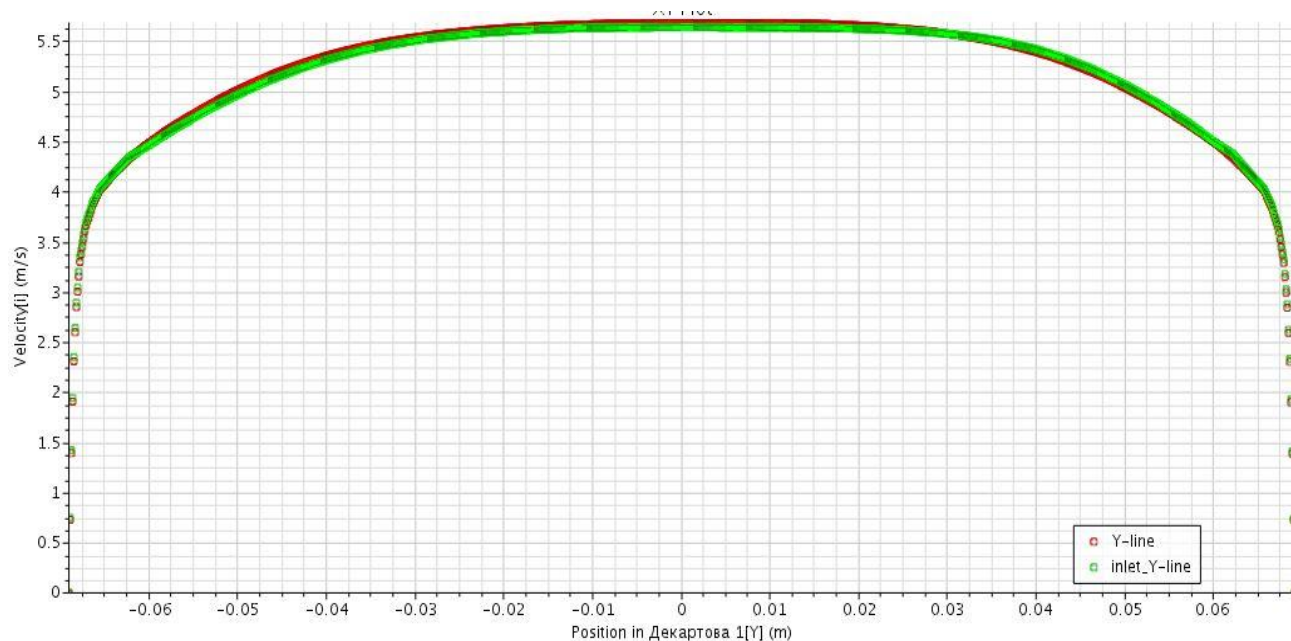


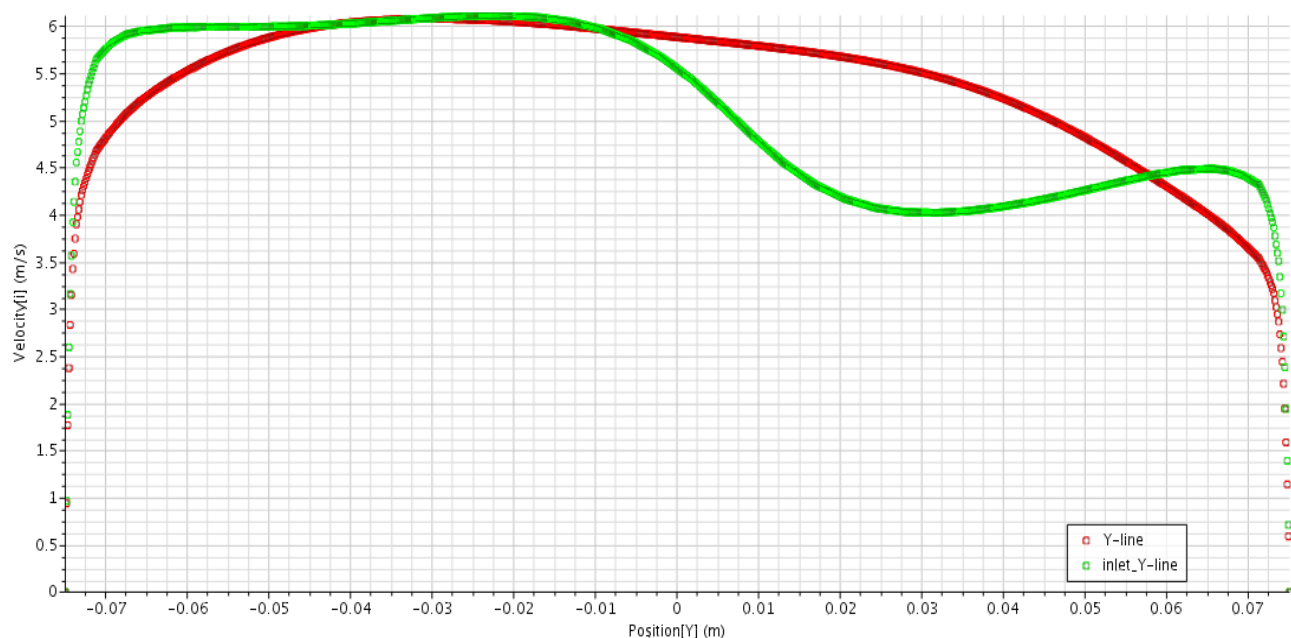
Рисунок 27 в. Линии, вдоль которых построены профили потока (разработано авторами)

Результат работы выпрямителя потока показан на рисунке 28. В одном случае (рис. 28 а) на вход выпрямителя подан поток с полностью развитым профилем скорости. Это сделано для демонстрации отсутствия какого-либо существенного влияния диска на такой профиль. Во втором случае (рис. 28 б) на вход диска подан профиль после двойного отвода и показан результат работы выпрямителя.



Зеленая кривая — профиль скорости до диска; красная кривая — профиль скорости после диска

Рисунок 28 а. Полностью развитый профиль до диска
и после диска в сечении 3 калибра (разработано авторами)



Зеленая кривая — профиль скорости до диска; красная кривая — профиль скорости после диска

Рисунок 28 б. Профиль после двойного отвода на входе в выпрямитель
и полностью развитый профиль в сечении 3 калибра после диска (разработано авторами)

Результаты работы формирователя потока показаны на рисунках 29–33.

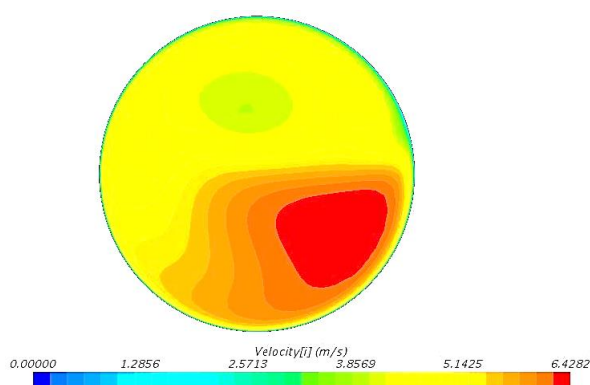


Рисунок 29 а. Скалярное поле осевой скорости после двойного отвода. Сечение 3 калибра (разработано авторами)

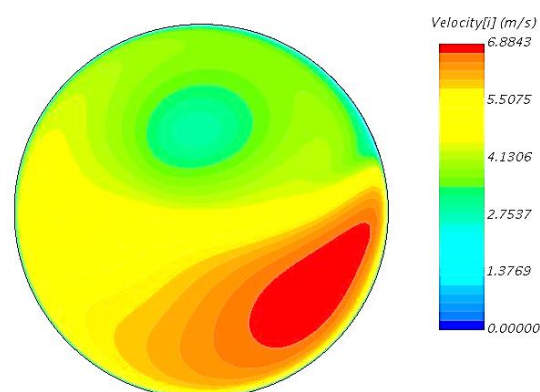


Рисунок 29 б. Скалярное поле осевой скорости после формирователя потока. Сечение 8 калибров (разработано авторами)

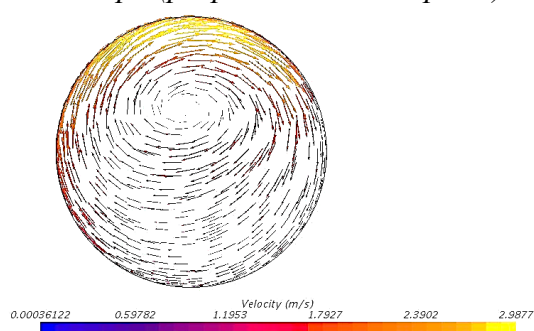


Рисунок 29 в. Векторное поле осевой скорости после двойного отвода. Сечение 3 калибра (разработано авторами)

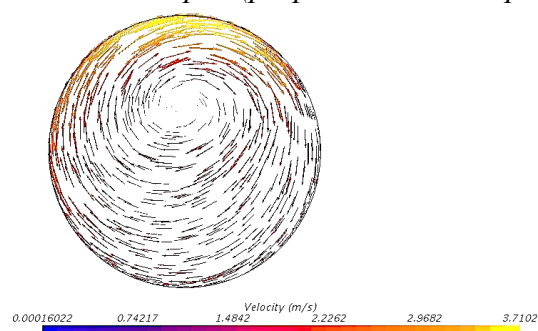
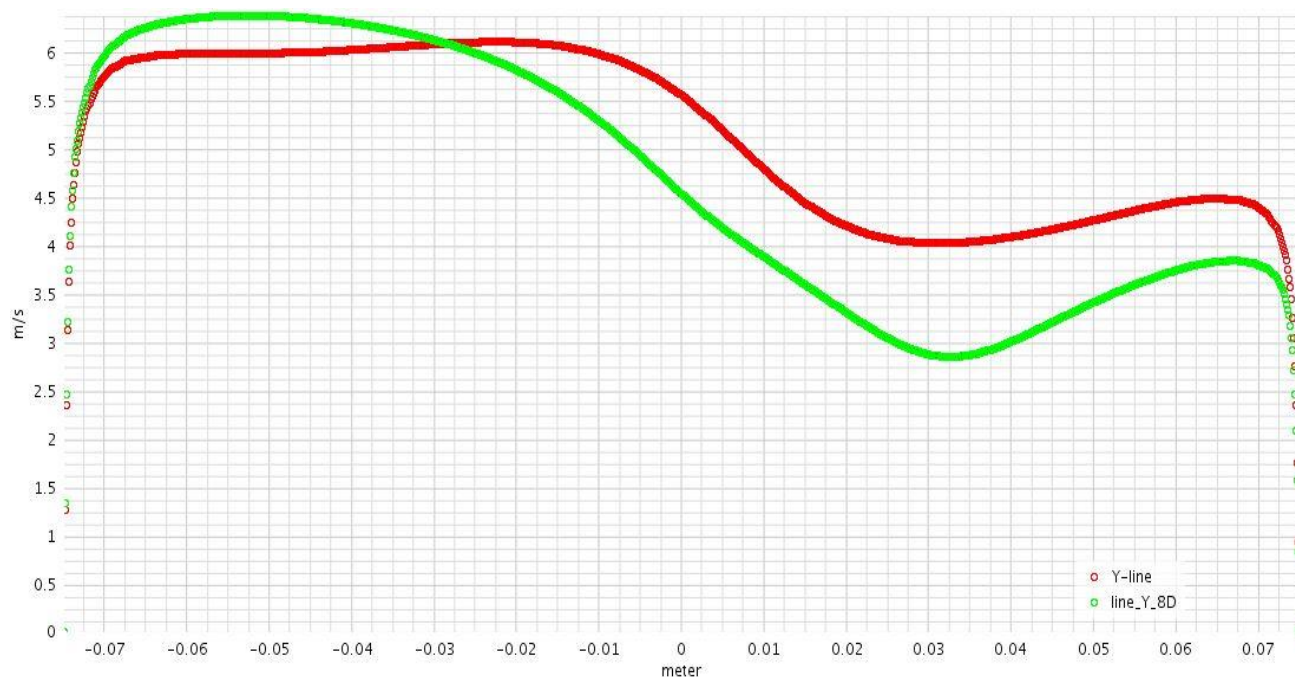


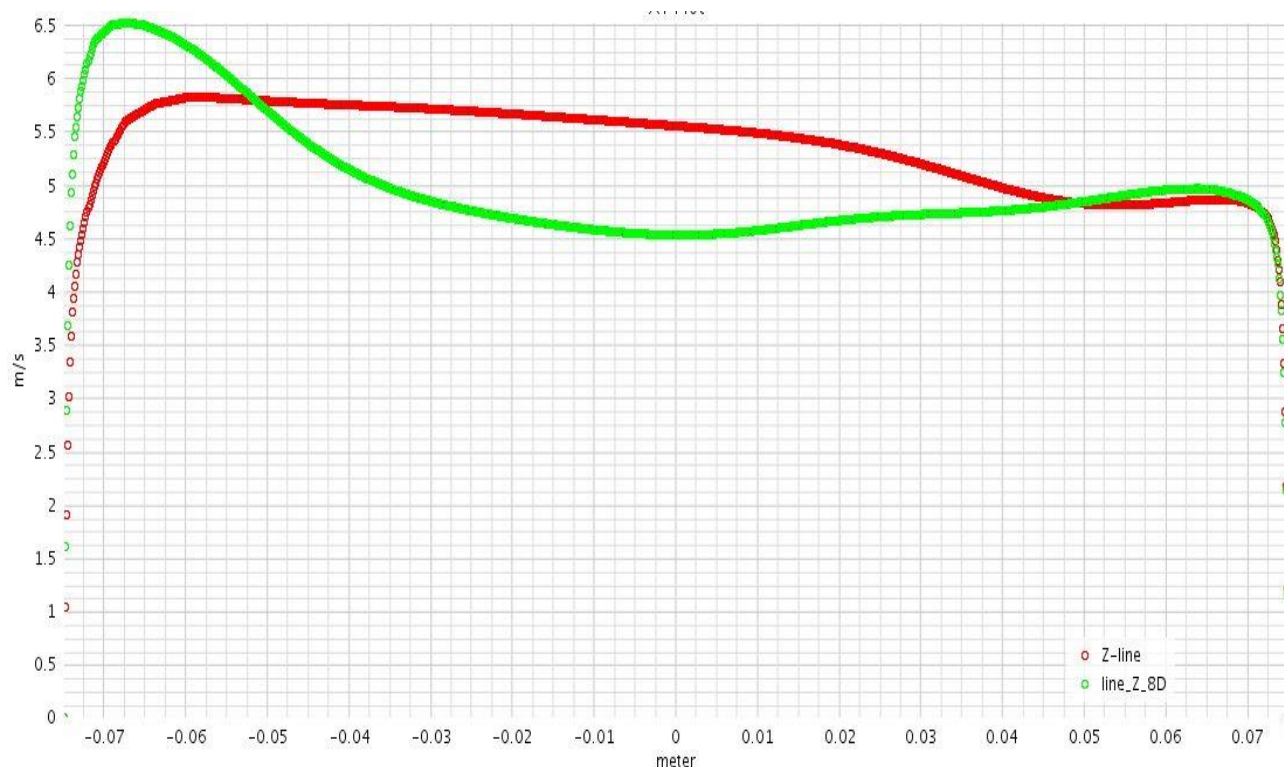
Рисунок 29 г. Векторное поле осевой скорости после формирователя потока. Сечение 8 калибров (разработано авторами)

Ниже приведено сравнение профилей скорости:



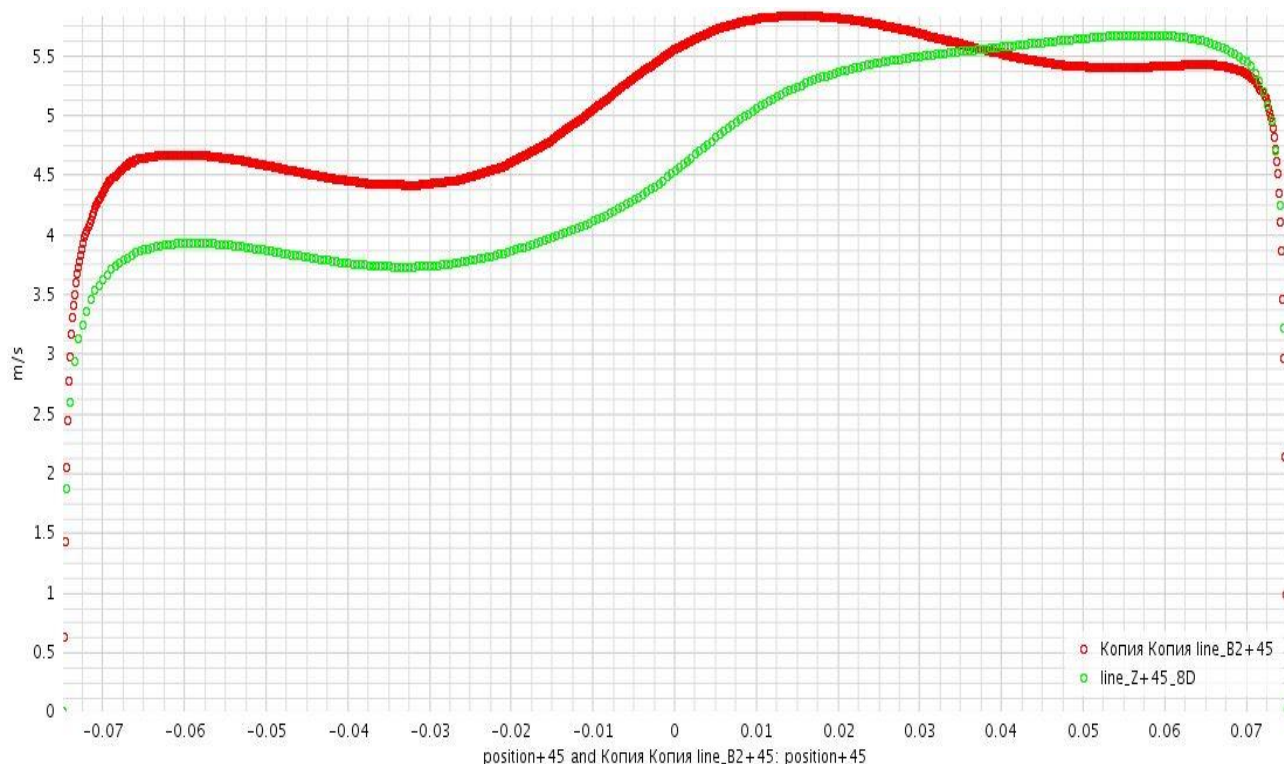
Красная кривая — профиль в сечении 3D после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8D после формирователя потока

Рисунок 30. Профиль скорости вдоль Линия Y (разработано авторами)



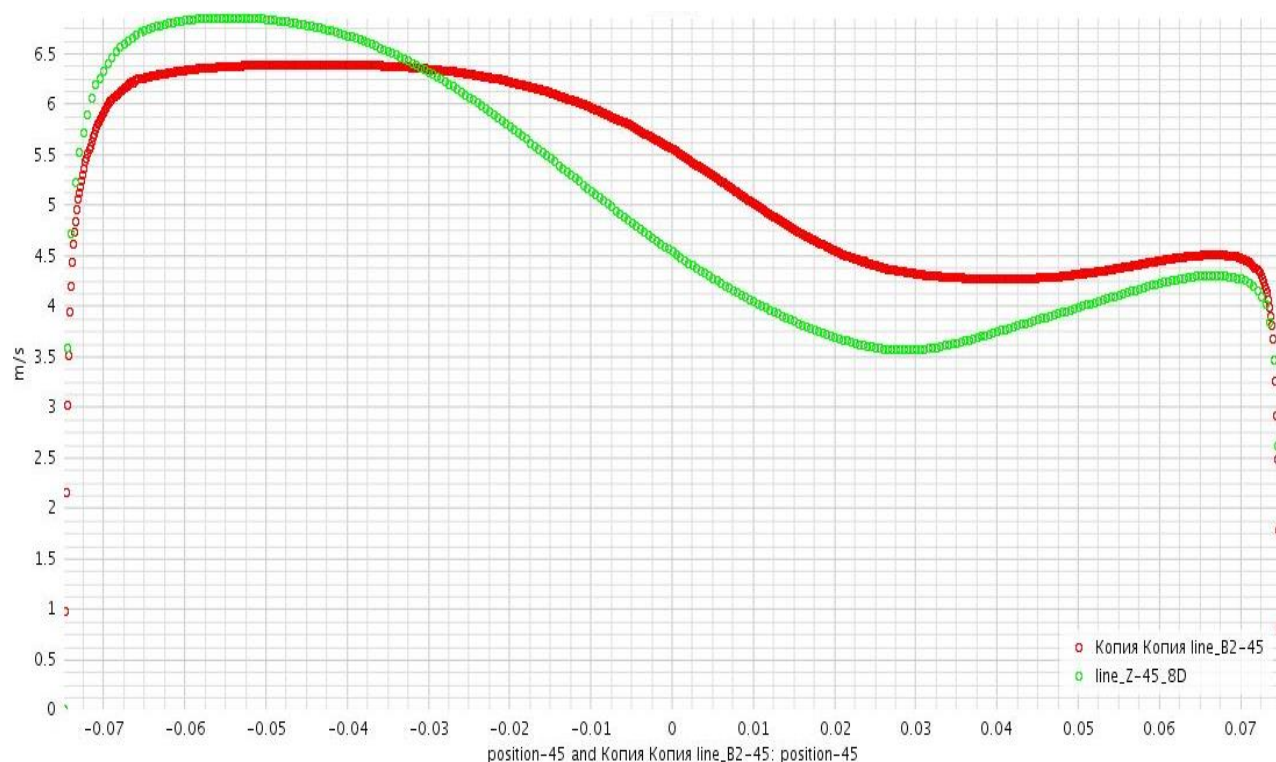
Красная кривая — профиль в сечении 3 калибра после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8 калибров после формирователя потока

Рисунок 31. Профиль скорости вдоль Линия Z (разработано авторами)



Красная кривая — профиль в сечении 3 калибра после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8 калибров после формирователя потока

Рисунок 32. Профиль скорости вдоль Линия Z+45 (разработано авторами)



Красная кривая — профиль в сечении 3 калибра после двойного отвода; синяя кривая — профиль в сечении 8 калибров после формирователя потока

Рисунок 33. Профиль скорости вдоль Линия Z-45 (разработано авторами)

Заключение

Как показывает практика, разработка устройств, упрощающих проектирование лабораторных стендов для исследования ультразвуковых расходомеров имеет принципиально важное значение для развития газовой отрасли России. Своевременное использование таких устройств, как формирователи и выпрямители потоков в лабораторных условиях сильно упрощают проведение исследований и экспериментов. А выпрямители потока используются еще и на газораспределительных станциях, где не имеется возможности обеспечить длинный прямой участок перед расходомером. В работе описаны основные принципы и идеи, которые могут быть использованы при разработке формирователей и выпрямителей потока перфорированного типа. Выявлены и перечислены факторы, влияющие на поле течения за таким устройством. По результатам исследований в качестве основного способа разработки формирователя потока взят метод, при котором сначала разрабатывается выпрямитель потока, способный трансформировать искривленный профиль в полностью развитый, а также, не искажающий полностью развитый поток, проходящий через него. А затем, на основе количества и размеров отверстий выпрямителя проводится проектирование формирователя потока за счет поворота отверстий по направляющим косинусам, которые вычислялись на основе результатов моделирования течения после двойного отвода. Авторы настоящей статьи пришли к выводу, что большое число малых отверстий хоть способно добавить гибкости «настройки» структуры потока за диском, но при этом сильно возрастает трудоемкость такой операции, а результат не сильно превосходит, а порой и вовсе не превосходит конструкции с малым числом крупных отверстий. Кроме того, следует помнить, что крупные отверстия менее подвержены засорам и загрязнениям при эксплуатации в реальных условиях потока природного газа. Спроектированными финальными образцами диском авторы показали, что, используя описанный подход, можно получать хорошие качественные и количественные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lynnworth, L.C.; Liu, Y. Ultrasonic flowmeters: half-century progress report. — Ultrasonics 2006, 44, pp. 1371–1378. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.046>.
2. Qiu, Y.; Chen, H.; Li, W.; Wu, F.; Li, Z. Optimization of the tracer particle addition method for PIV flowmeters. Processes 2021, 9, 1614. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091614>.
3. Fonseca, G.E.; Dube, M.A.; Penlidis, A. A Critical overview of sensors for monitoring polymerizations. — Macromol. React. Eng. 2009, 3, pp. 327–373. URL: <https://doi.org/10.1002/mren.200900024>
4. Fang, L.; Ma, X.; Zhao, J.; Faraj, Y.; Wei, Z.; Zhu, Y. Development of a high-precision and wide-range ultrasonic water meter. — Flow Measurement and Instrumentation. 2022, 84 URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102118>.
5. Dandan Zheng, Dan Zhao, Jianqiang Mei. Improved numerical integration method for flow rate of ultrasonic flowmeter based on Gauss quadrature for non-ideal flow fields. — Flow Measurement and Instrumentation. 2015. Vol 41. pp. 28–35.
6. Chen, J.; Zhang, K.; Wang, L.; Yang, M. Design of a high precision ultrasonic gas flowmeter. Sensors 2020, 20. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32858827>.
7. Don Augenstein, Herb Estrada, Ernie Hauser, Ed Madera. Cfd prediction of hydraulic effects on external ultrasonic flowmeters // International Conference on Nuclear Engineering (Proceedings of ICONE14). — July 17–20, Miami, Florida, USA URL: DOI: 10.1115/ICONE14-89513.
8. Jeff Gibson. Validation of the CFD method for determining the measurement error in Flare Gas Ultrasonic meter installations // 27th International North Sea Flow Measurement Workshop, 20th–23rd October, 2009 URL: <https://nfogm.no/wp-content/uploads/2019/02/2009-16-Validation-CFD-method-determining-measurement-error-Flare-Gas-Ultrasonic-meter-installations-Gibson-TUV-NEL.pdf>
9. J.G. Drenthen, Martin Kurth. Reducing installation effect on ultrasonic flow meters // 27th North Sea Flow Measurement Conference, Tonsberg, 2009. URL: <https://nfogm.no/wp-content/uploads/2019/02/2009-10-Reducing-installation-effects-on-ultrasonic-flow-meters-Drenthen-Krohne-CT-Products.pdf>
10. B. Wang, Y. Cui, W. Liu, X. Luo. Study of transducer installation effects on ultrasonic flow metering using computational fluid dynamics. — Advanced Materials Research Vol. 629(2013) pp. 676–681 URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.629.676>.
11. E. Luntta, J. Halttunen. Neural network approach to ultrasonic flow measurements. — Flow Measurement and Instrumentation. 1999. Vol 10. pp. 35–43 URL: [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(98\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(98)00035-1).
12. Santhosh K.V., B.K. Roy. An intelligent flow measurement scheme using ultrasonic flow meter. — Modelling, Identification and Control, 770: Advances in Computer Science and Engineering — 2012 URL: DOI:10.2316/P.2012.769-033.
13. Mario Turiso, Martin Straka, Jürgen Rose, Christian Bombis, Denis F. Hin. The asymmetric swirl disturbance generator: Towards a realistic and reproducible standard. — Flow Measurement and Instrumentation. Vol. 60(2018) pp. 144–154. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.02.021>.

14. Mickan, B.; Kramer, R.; Wendt, G. and Dopheide. Quantified comparison of the efficiency of new flow conditioners. (Flomeko 2000) // IMEKO TC9 Conference Salvador, Bahia, BRAZIL 4-8 June, 2000. URL: <https://www.imeko.org/publications/tc9-2000/IMEKO-TC9-2000-009.pdf>.
15. Gabriel Moniz Pereira, Bodo Mickan, Rainer Kramer, Dietrich Dopheide. Investigation of flow conditioning in pipes // 11th IMEKO TC9 Conference on Flow Measurement Groningen, Netherlands, 12–14 May 2003. URL: DOI: 10.1007/978-3-642-59334-5_122.

Alekseev Dmitry Pavlovich

SovTIGaz, Moscow, Russia

E-mail: alekseev210@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=687192

Kubenin Aleksandr Sergeevich

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: kube-n@mail.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=935093

On the use of perforated disk inserts in a round pipe to form a gas flow of the required structure in front of an ultrasonic flow meter

Abstract. Unlike conventional gas meters, ultrasonic flow meters have such advantages as contactless operation, minimal pressure loss and high accuracy. When developing ultrasonic flow meters, like any other devices, assumptions and simplifications related to the theory of ultrasonic flow meters are used. When developing such devices, researchers do not always have the necessary space to deploy such structures. Therefore, the question arises of developing devices that can replace large sections of pipelines with various turns in the role of local resistances. The paper presents some studies conducted during the development of a perforated disk capable of forming a flow profile similar to the profile after a double bend. The presented results of a study of the influence of the perforated disk geometry on the gas dynamics and flow structure. The calculations were carried out using three-dimensional computer modeling. The analysis of the influence of the hole location, their sizes and the angles of inclination of the holes relative to the disk axis on the velocity distribution and the formation of the velocity profile downstream of the disk is the purpose of this study. Scalar and vector fields of velocities downstream of the perforated disk are obtained. Velocity profiles in sections behind the disk are constructed. A comparative analysis of different designs of perforated disks is carried out. The design principles of such flow formers are indicated. The geometric factors influencing the flow structure after the former are revealed. The revealed subtleties and described design principles made it possible to develop straighteners and flow formers based on perforated disks. The final samples of disks and the results of their operation are shown.

Keywords: gas supply; ultrasonic flow meter; computational fluid dynamics; computer modeling; flow profile; perforated disk; flow former; flow meter geometry; multi-beam ultrasonic flow meters; flow straightener