

УДС 697.911

**ПОСТРОЕНИЕ АДЕКВАТНОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ
КЛАПАНОВ**

Чеховской А. И., Скорик Т. А.

Донской государственный технический
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

achevskoy@gmail.com

В статье исследуются методы оценки адекватности математических моделей вентиляционных клапанов различных типов. Приводятся результаты анализа теоретических зависимостей и приложения математического аппарата для решения задач, описывающих физические процессы регулирования воздушных потоков. Обработка многочисленных экспериментальных данных с использованием современных компьютерных программ для построения сложных математических моделей и их визуализация обеспечили достаточные условия адекватности и достоверность результатов исследования аэродинамических характеристик вентиляционных клапанов.

Ключевые слова: модель, моделирование, математическая модель, вентиляционный клапан, аэродинамические характеристики, компьютерные программы.

Введение. Современные темпы и достижения научно-технического прогресса изменили подходы к изучению физических процессов, происходящих в природе. Невозможно представить современное развитие науки и техники без применения методов математического моделирования. Сущность этого метода заключается в замене исходного объекта его аналогом — математической моделью и оперированию ею для получения сведений об исследуемом объекте при помощи современных компьютеров и программно-алгоритмических средств.

Альтернативой математическому моделированию является физическое макетирование, но математическое моделирование имеет ряд преимуществ, заключающихся в сокращении времени и затрат на проведение эксперимента, а также возможность проведения экспериментов на критических режимах, которые привели бы к разрушению физического макета.

Однако воспользоваться преимуществами электронной формы имитации технических процессов можно лишь при условии адекватного отображения физической реальности в математической форме. Одному и тому же объекту-оригиналу, в зависимости от целей

UDC 697.911

**CONSTRUCTION OF AN ADEQUATE
MATHEMATICAL MODEL FOR
VENTILATION VALVES AERODYNAMIC
CHARACTERISTICS RESEARCH**

Chekhovskoy A.I., Skorik T. A.

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

achevskoy@gmail.com

The article examines the methods for assessing the mathematical models adequacy of ventilation valves of various types. The results of the analysis of theoretical dependencies and applications of the mathematical apparatus for solving problems describing the physical processes of airflow control are given. Processing of numerous experimental data using modern computer programs for the construction of complex mathematical models and their visualization provided sufficient conditions for the adequacy and reliability of the research results of ventilation valves aerodynamic characteristics.

Keywords: model, simulation, mathematical model, ventilation valve, aerodynamic characteristics, computer programs.

моделирования, может соответствовать большое число моделей, отражающих разные его свойства и характеристики. Основной задачей математического моделирования является создание модели, способной отображать заданные свойства изучаемого сложного технического объекта с погрешностью не выше допустимой [1–3].

Моделирование, как метод исследования технологических процессов, включает в себя следующие основные этапы:

1. Постановка цели и задач моделирования объекта;
2. Построение модели объекта;
3. Проверка адекватности модели и внесение корректив;
4. Использование созданной модели для исследования свойств и поведения объекта.

В данной работе изучается возможность использования существующих математических моделей для описания аэродинамических характеристик вентиляционных клапанов и оптимизации их рабочих показателей: производительности, гидравлического сопротивления, плотности, времени отклика и других параметров, формирующих их коэффициент полезного действия (КПД). С целью оценки соответствия полученных математических зависимостей реальным объектам был проведен физический эксперимент.

Для исследования аэродинамических характеристик вентиляционных клапанов был использован лабораторный стенд (рис. 1), в котором возможно создавать условия близкие к реальным эксплуатационным.

Однако для определения границ допустимых областей работы оборудования также существуют испытания, которые необходимо проводить на предельных значениях режимных параметров, которые зачастую сложно провести в реальных условиях из-за конструктивных особенностей и удорожания испытательного стенда.

В таких условиях очень важно иметь иные способы проведения необходимых испытаний.

Одним из способов является математическое моделирование при помощи математических формул и зависимостей. Другой способ — это проведение испытаний с помощью специализированных компьютерных программ, позволяющих получить большой объем информации об исследуемом объекте, а также физические характеристики, получаемые при воздействии на этот объект.



Рис. 1. Стенд для определения аэродинамических характеристик вентиляционных клапанов

Математическое моделирование

Рассмотрим способ математического моделирования, основанный на описании физического процесса посредством математических зависимостей.

Клапаны используются для регулирования различных параметров технологического процесса — давления, расхода, температуры и т.д.

Их положение a задается в относительных единицах $0 \leq a \leq 1$. Ноль соответствует закрытому состоянию, единица — полностью открытому. Вал клапана движется с постоянной скоростью. Математическая модель привода клапана описывается нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{da}{dt} = \frac{k_{\text{кл}} f(a_{\text{зад}} - a)}{T_{\text{кл}}},$$

где a и $a_{\text{зад}}$ — текущее и заданное положения клапана в относительных единицах; $k_{\text{кл}}$ — коэффициент передачи клапана; $T_{\text{кл}}$ — время полного открытия/закрытия клапана; f — нелинейная функция, реализующая постоянную скорость вращения вала клапана и равная $f = \text{signum}(a_{\text{зад}} - a)$.

Кроме уравнения привода клапана необходимо знать его статическую характеристику относительно регулируемой величины

$$x = \varphi(a),$$

где x — регулируемый параметр, a — положение клапана. Статическая характеристика клапана, как правило, снимается экспериментально и содержит гистерезис, рис. 2 [4].

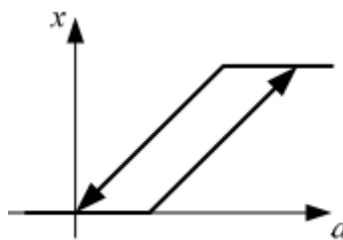


Рис. 2. Статистическая характеристика клапана

В данном случае представлена математическая модель, описывающая процесс работы регулирующего вентиляционного клапана. Это достаточно простой физический процесс, но для его описания были применены достаточно сложное дифференциальное уравнение, что говорит о значительной трудоемкости данного способа моделирования.

Поле скоростей. В данной работе было применено компьютерное моделирование аэродинамических характеристик вентиляционного клапана, являющееся современным способом математического моделирования.

На первом этапе производился выбор модели для описания аэродинамических процессов в вентиляционном клапане. Были изучены различные способы изучения структуры потока и его влияние на физические процессы, протекающие в вентиляционном клапане. Наиболее полную информацию о структуре потока можно получить, зная скорость потока в любой точке устройства. Для этого необходимо получить поле скоростей. Но при таком подходе встречаются труднопреодолимые препятствия. Экспериментальное решение данной задачи заключается в измерении скоростей потока во всех его частях, что чрезвычайно трудно. Кроме того, в любом аппарате имеются области, где сложно или невозможно измерить скорость, не нарушив структуру потока. Поле скоростей лишь частично дает возможность решения практических задач. Чаще

всего это решение оказывается настолько сложным, что значительной частью информации, которая заключена в данных о поле скоростей, воспользоваться не удастся.

Поле скоростей — сложная трехмерная структура, описание которой должно содержать функции, по меньшей мере, трех координат.

Нестационарность процесса (например, в турбулентном потоке) добавляет четвертую координату — время. Математическое описание поля скоростей получается в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных. Решить такую систему даже с помощью современных ЭВМ удастся лишь в простейших случаях, так как решение требует большого количества времени и трудозатрат.

Компьютерное моделирование. Компьютерное моделирование относят к математическому, так как чтобы написать программный код, позволяющий детально и с высокой точностью производить расчёты, необходимо в коде отразить множество физических процессов, зависимости одних характеристик от других, свойства материалов и веществ. Это колоссальный труд, проводимый инженерами и программистами для создания программы позволяющей делать подобные вычисления. Одной из таких программ является SolidWorks.

SolidWorks — программный комплекс САПР для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Он обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Главным его преимуществом являются широкие возможности инженерного анализа таких характеристик, как прочность, устойчивость, теплопередача, частотный анализ, динамика механизмов, газо- и гидродинамика, оптика и светотехника, электромагнитные расчеты, анализ размерных цепей и пр.

Для компьютерного моделирования в SolidWorks необходимо корректно выполнить следующие этапы:

1. Описать с достаточной степенью точности все геометрические особенности объекта.
2. Разработать и построить оптимальную сеточную структуру, позволяющую найти конечное решение за разумный временной период. С другой стороны, число ячеек в сеточной структуре должно быть достаточным для выявления тонких структур течения второго и третьего порядка малости по отношению к среднему течению, что достигается измельчением сеточной системы в критичных областях.
3. Сформулировать граничные условия задачи, для чего необходимо понимание качественной стороны происходящих процессов.
4. Выбрать модель процесса, являющуюся эффективной для описания потоков с высокой интенсивностью турбулентности на базе априорной информации, анализа и обобщения результатов других исследователей.

В данной работе приводятся результаты использования программы SolidWorks для разработки новых или оптимизации уже имеющихся вентиляционных клапанов.

Основной целью в таком исследовании является уменьшение коэффициента местного сопротивления (ξ), который рассчитывается как:

$$\xi = \frac{\Delta p}{p_d},$$

где Δp — потери полного давления.

Потери полного давления Δp потока элемента сети рассчитывают по формуле:

$$\Delta p = p_1 - p_2,$$

где p_1 и p_2 — полные давления элемента сети в мерных сечениях 1 и 2, расположенных, соответственно, на входе в элемент и на выходе из него.

p_d — динамическое давление средней скорости движения воздуха. Определяют его по измеренным в z точках.

$$p_d = \left(\frac{\sum_{i=1}^z p_{di}^{0.5}}{z} \right)^2,$$

где p_{di} — динамическое давление в мерной точке; z — количество точек замера [5].

При компьютерном моделировании необходимо построить 3х-мерную модель и задать граничные условия в соответствии с целями исследования. Далее необходимо по наглядно полученным результатам незначительно изменять конструкцию и снова нажимать «расчёт».

Ниже приводятся различные реализации подобных исследований.

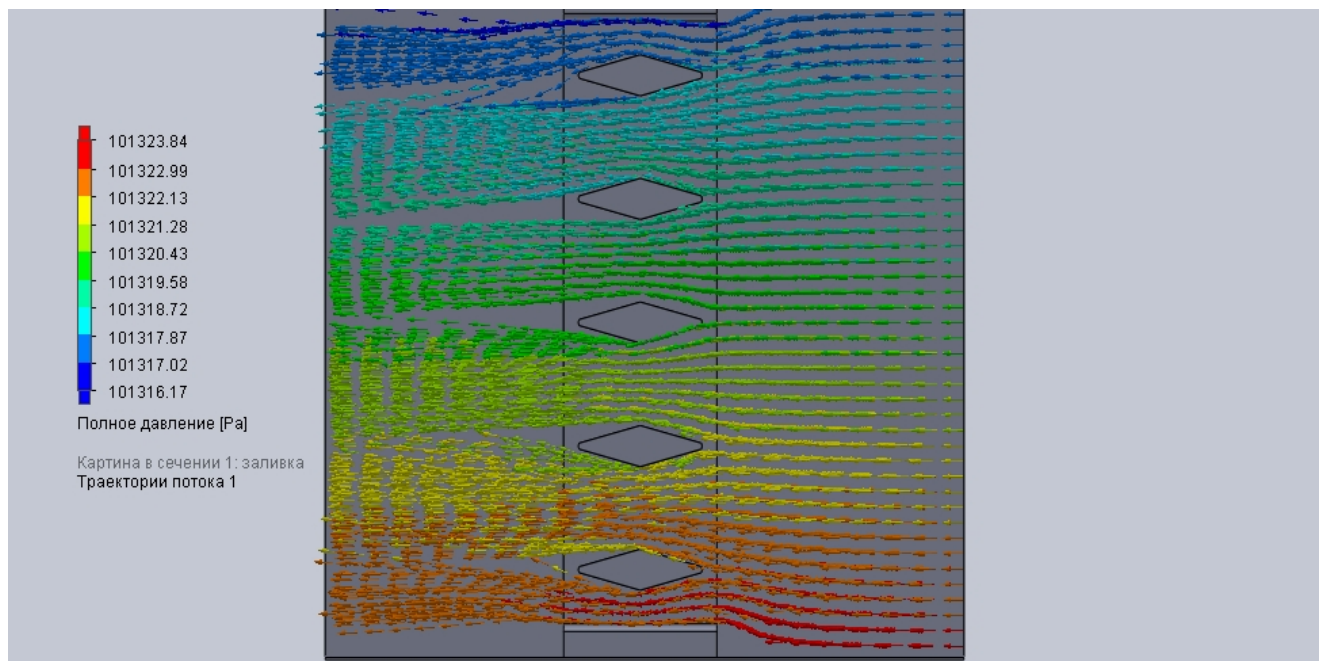


Рис. 1. Распределение полного давления в потоке канального клапана

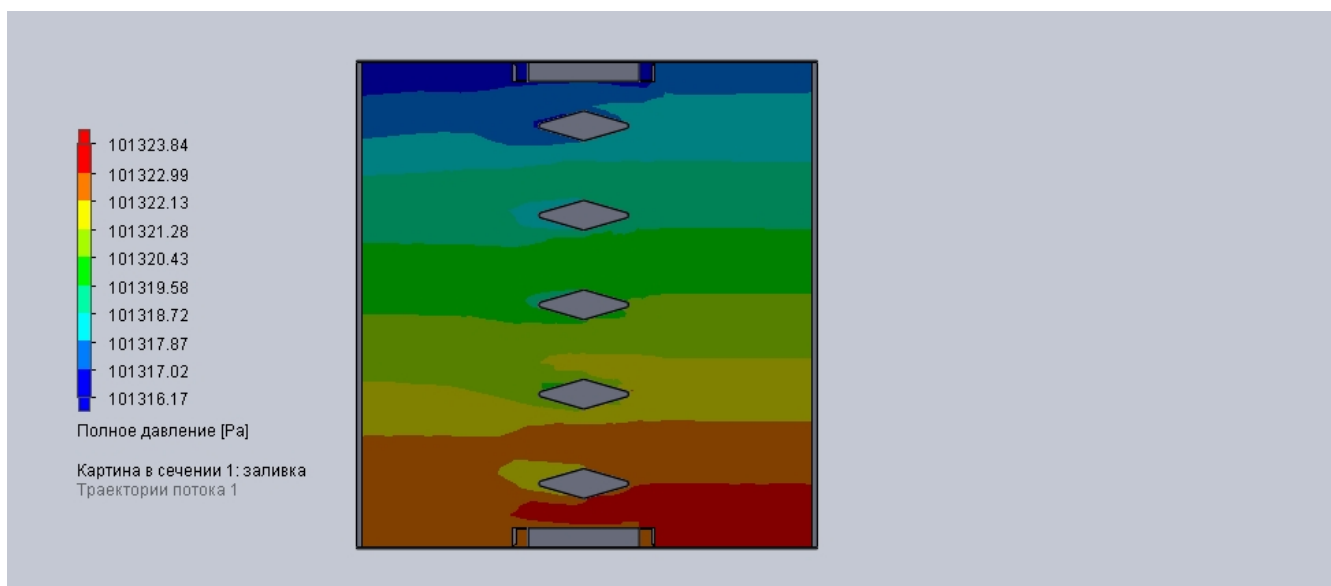


Рис.2. Поле полного давления в сечении клапана

Как видно из рис. 4, полное давление до и после клапана отличается, но незначительно. Подобные колебания затруднительно уловить в стендовой установке, в отличие от использования

программы, обеспечивающей с помощью визуализации максимальную наглядность результатов. Колебания видны в зависимости от ширины маркерных полос до и после клапана.

Также при помощи программы можно выгружать все необходимые данные в виде отчетов в Excel и Word, что позволяет сократить время на обработку результатов по всем типам конструкции.

Еще одна задача, которую можно решить, используя данную программу, — это определение падения давления в клапане во время регулирования и по итогам составить диаграмму падения давления, что необходимо для характеристики регулирующих клапанов.

В продолжение предыдущей задачи, после определения оптимальной формы лопаток, необходимо определить падение давления при разном положении лопаток. Положение лопаток влияет не только на расход воздуха, но и на коэффициент местного сопротивления клапана. При этом выбранная форма лопаток в полностью открытом состоянии может быть уже не самой оптимальной и тогда необходимо корректировать форму створок клапана для дальнейшего анализа.

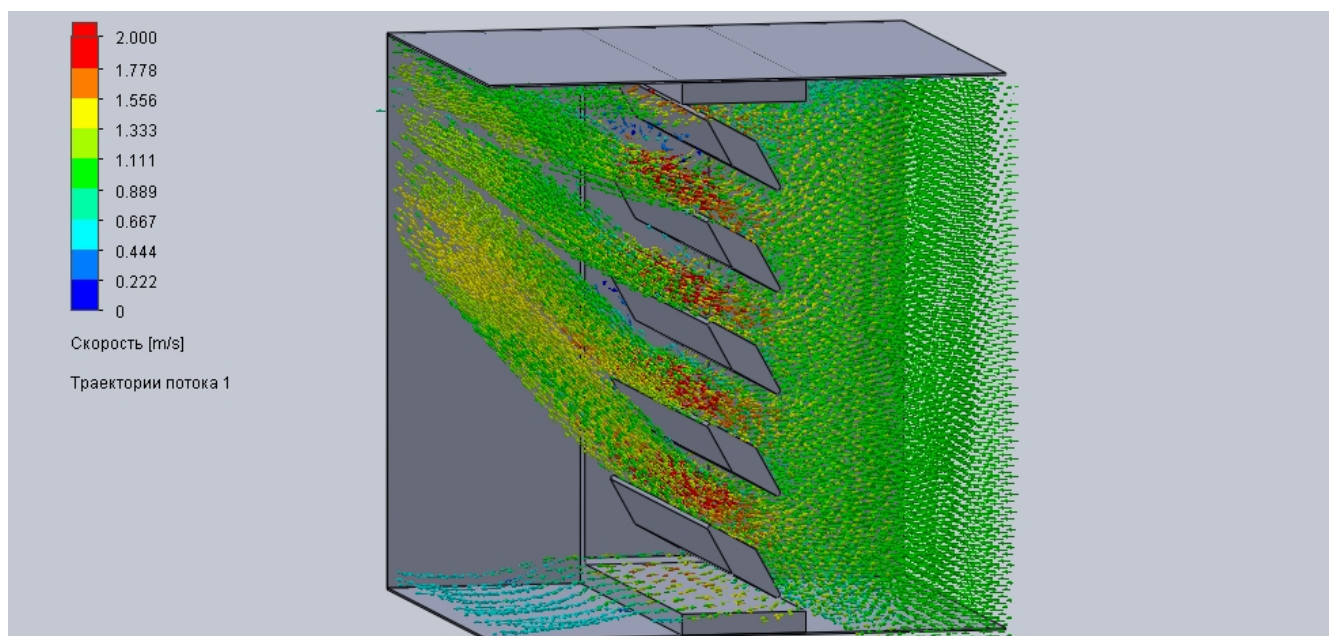


Рис. 5. Распределение скорости в потоке канального клапана

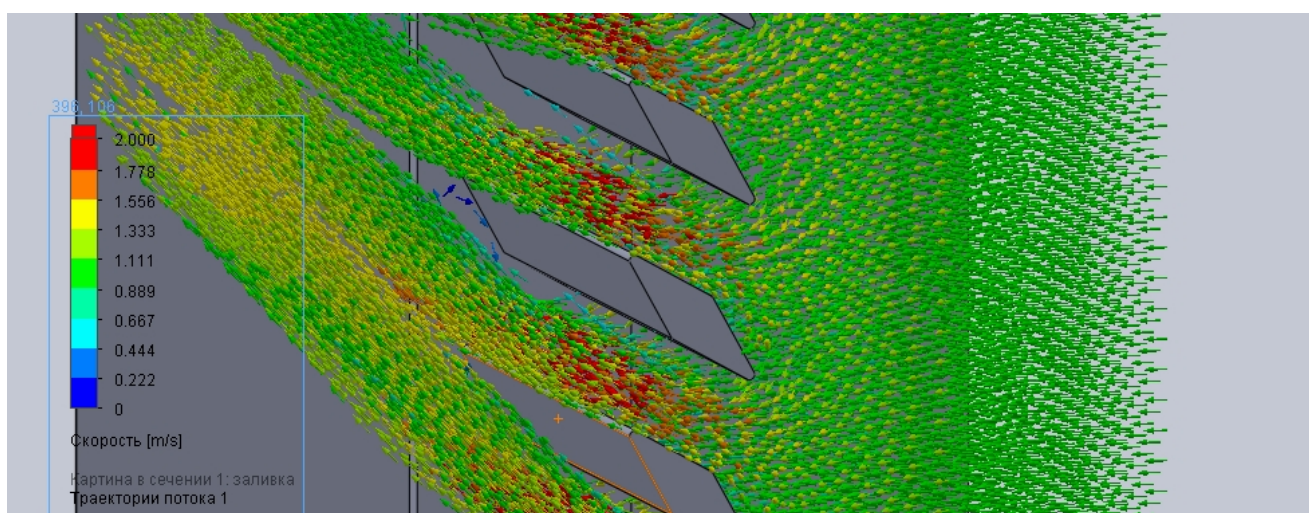


Рис. 6. Распределение скорости в потоке канального клапана

Исходя из рис. 5 и 6 можно увидеть, как распределяется скорость, проходя через лопатки клапана в положении 45° . Таким же образом можно провести анализ для всех возможных положений клапана и построить диаграммы падения давления (рис. 7), которые приводятся во всех каталогах подбора канального оборудования.

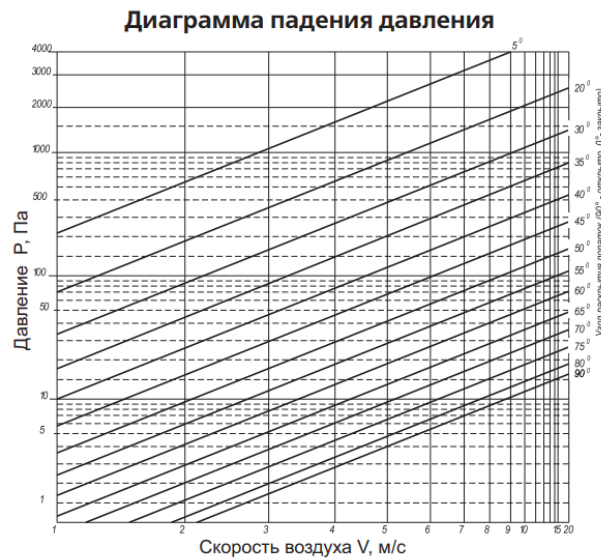


Рис. 7. Диаграмма падения давления

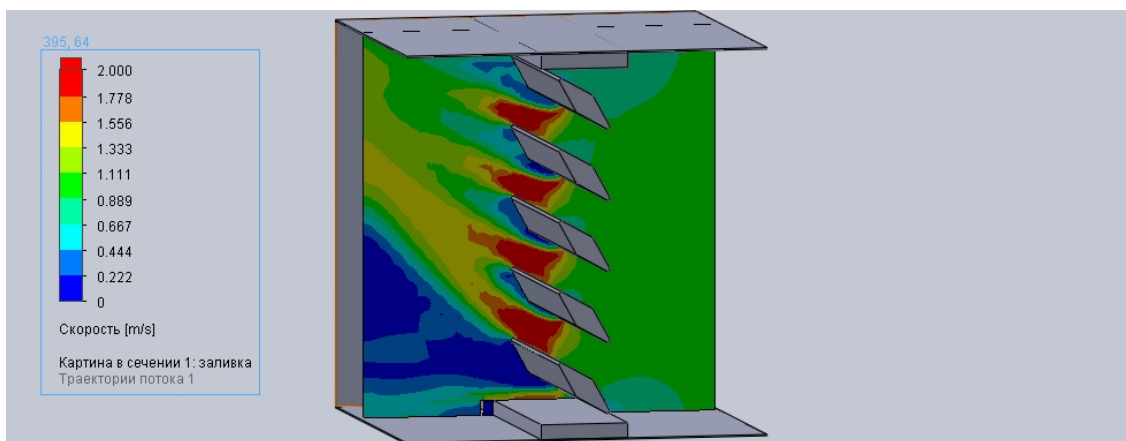


Рис. 8. Поле скоростей в выбранном сечении

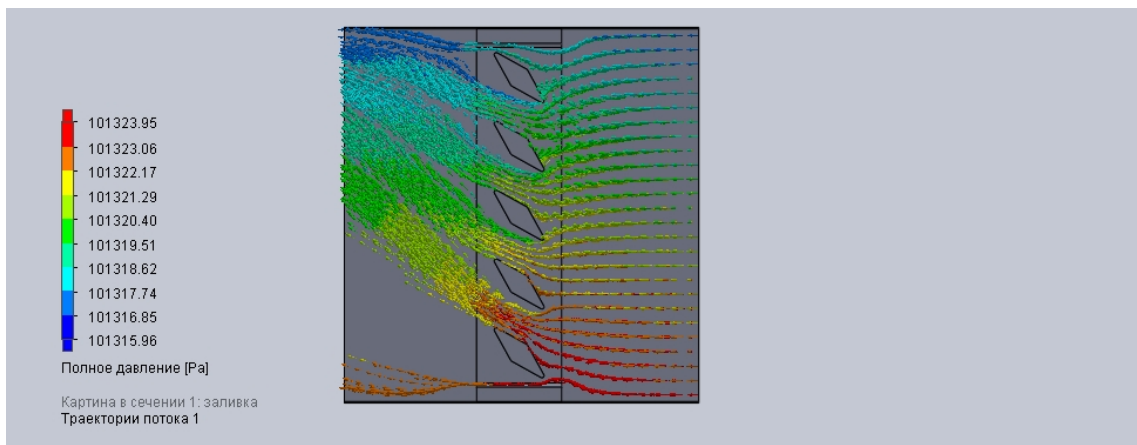


Рис. 9. Изменение полного давления в сечении клапана

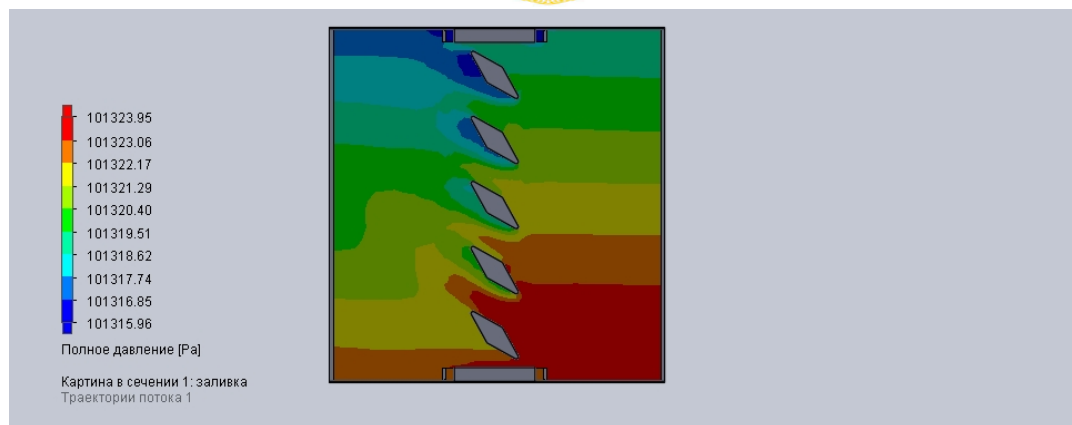


Рис. 10. Поле полного давления в сечении клапана

Заключение. Таким образом, можно наглядно увидеть проблемные места, где возникают зоны низкого и высокого давления, максимальные и минимальные скорости и даже проанализировать шумовую нагрузку, чтобы дать максимально точную оценку исследуемому клапану.

Подводя итоги по использованию компьютерного моделирования для целей данного исследования, можно отметить следующее.

Наглядные изображения различных вариантов исследуемых процессов (рис. 3–6, 8–10) являются визуализацией результатов описания оцифрованного трехмерного течения в исследуемом объекте в его динамическом развитии.

SolidWorks позволяет вести разнообразную статистическую обработку материала, визуализировать течение в интересующем диапазоне скоростей, показывать модули различных полей (скоростных, температурных, давления, концентрационных) в необходимых сечениях, наблюдать движение трассеров, перемещающихся в потоке, и многое другое. Интерпретационные возможности пакета достаточно широки, они позволяют увидеть, а затем и понять неочевидные моменты и нюансы течений, не всегда совпадающих с интуитивными ожиданиями [6].

Библиографический список

1. Бусленко, Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. — Москва : Советское радио, 1973. — 440 с.
2. Емельянова, С. В. Технология системного моделирования / С. В. Емельянова. — Москва : Машиностроение, 1988. — 520 с.
3. Рахманкулов, В. З. Об адекватности виртуальных компьютерных моделей процессов автоматизированного проектирования сложных технических систем / В. З. Рахманкулов, А. А. Ахрем // Управление информационными потоками : сб. трудов ИСА РАН. — Москва : УРСС, 2002. — 24 с.
4. Уткин, М. А. Математические модели управляемых технологических процессов перевалки сжиженных углеводородных газов / М. А. Уткин, С. А. Иванов, М. И. Исаков // XII Всероссийское совещание по проблемам управления-2014. — ВСПУ — 2014. — С. 4502.
5. ГОСТ 12.3.018–79. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний [электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. — Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200004609> (дата обращения : 14.02.2019).
6. Бурцев, С. И. Математическое моделирование процессов турбулентного переноса в профессиональной практике техники вентиляции и кондиционирования воздуха / С. И. Бурцева, Д. М. Денисихана // Вентиляция. Отопление. Кондиционирование : АВОК. — 2006. — № 5. — С. 40–44.