На правах рукописи
УДК 62-575.1

Москалев Игорь Владимирович

ПУСК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕВОГО ТУРБСТАРТЕРА

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Гришин Юрий Аркадьевич профессор кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Патрахальцев Николай Николаевич профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» РУДН
	кандидат технических наук Козлов Владимир Иванович ОАО НИИ «Химмаш», старший научный сотрудник, отдел № 10
Ведущее предприятие:	Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Защита диссертации состоится 18 декабря 2013 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан 13 ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент Тумашев Р.З.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В транспортной составляющей экономики РФ автомобильный транспорт играет основную роль. Порядка 80 % всех предприятий во всех отраслях и такой же процент населенных пунктов в РФ в качестве подъездных путей имеют только автомобильные дороги. В такой ситуации особое значение приобретает повышение экономической эффективности автотранспортной инфраструктуры в целом и, в частности, за счет снижения удельной металлоемкости автомобилей. Пусковые системы являются неотъемлемой частью силовых установок с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). На изготовление систем электростартерного пуска (СЭП) для 1 миллиона автомобилей и тракторов расходуется от 20 до 150 тысяч тонн цветного металла, а на их перевозку – от 0,5 до 2 % топлива, потребляемого автомобилями. Вследствие применения цветных металлов – свинца и электротехнической меди – СЭП имеют высокую стоимость. Кроме того они характеризуются худшими пусковыми качествами при низких температурах, свойственных многим регионам РФ. Это обусловлено значительным падением силы тока в аккумуляторных батареях при охлаждении до отрицательных температур. Таким образом, улучшение пусковых, эксплуатационных и экономических качеств систем пуска — одно из важнейших направлений совершенствования двигателей.

Применение турбостартеных систем (ТС) позволяет избежать ряда проблем, связанных с применением СЭП. Однако существующие современные ТС также имеют недостатки, связанные с высокой частотой вращения, требующей использование дорогих редукторов, или с надежностью и долговечностью. В то же время, высокая пожаробезопасность; обеспечение более надежного пуска; существенно меньшая по сравнению с СЭП удельная металлоемкость и стоимость становятся весомым основанием для продолжения исследований в области совершенствования ТС. Крайне перспективным является применение ТС на основе вихревой турбины. Однако на сегодняшний день данный тип устройств недостаточно хорошо изучен. Число научных работ, посвященных вихревым турбинам невелико, а их исследование на данный момент ограничивается упрощенными теоретическими выкладками и дорогостоящими экспериментами. В связи с этим, конструкция проточной части существующих вихревых турбин не оптимальна, и в ряде исследований показано, что имеются большие резервы совершенствования вихревых агрегатов.

Совершенствование электронно-вычислительной техники и численных методов моделирования дали инженерам эффективные инструменты решения разнообразных задач. В последнее десятилетие при государственной поддержке в РФ активно развиваются суперкомпьютерные технологии, открывая новые возможности для эффективного решения исследовательских и оптимизационных задач. Возможности современных методов вычислительной гидродинамики и ЭВМ позволяют совершить заметный прорыв в понимании газодинамических процессов в вихревых турбинах и в совершенство-

вании их конструкции, за счет чего существенно поднять их эффективность без затрат на дорогостоящие эксперименты.

Применение же вихревых турбин в составе ТС позволит решить множество проблем существующих систем пуска двигателей, работающих во всех широтах РФ. Поэтому разработка, совершенствование и апробация методик численного моделирования ТС, в том числе на основе вихревой турбины, представляют собой актуальную задачу.

Цель работы. Разработка методики численного моделирования динамической системы «двигатель-турбостартер» и проведение численных исследований газодинамики вихревой турбины и динамики процесса пуска дизельного двигателя с использованием вихревой турбины для выявления различных факторов, влияющих на эффективность ТС, а также для демонстрации преимуществ перспективной ТС на базе вихревой турбины с помощью отечественного программного комплекса FlowVision.

Научная новизна. Впервые разработана методика численного моделирования динамической системы «двигатель-турбостартер», которая позволяет оценить динамические характеристики проектируемого турбостартера в связке с двигателем внутреннего сгорания. Это в свою очередь позволяет определить изменения во времени момента сопротивления двигателя, частоты вращения коленчатого вала и расхода воздуха турбиной для системы «двигатель-турбостартер», влияющие на качество пуска двигателя и характеризующие эксплуатационные качества системы пуска; дать оценку эффективности разработанного агрегата при установке на конкретный двигатель; прогнозировать потребный объем воздушной аккумуляторной системы.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обусловлены:

- использованием фундаментальных законов и уравнений газовой динамики, а так же современных численных методов реализации соответствующих математических моделей;
- согласованием результатов расчетных и экспериментальных исследований и применением при оценке адекватности математических моделей достоверных опытных данных.

Практическая значимость:

- разработана методика моделирования системы «двигатель-турбостартер», пригодная не только для моделирования систем, в состав которых входит как вихревая турбина, так и иные конструкции турбин. Разработанная методика позволяет существенно сократить расходы на проектирование и доводку проточной части турбостартеров;
- показана возможность и преимущества применения перспективной конструкции вихревой турбины в агрегатах пуска дизельных двигателей;
- даны рекомендации по повышению эффективности численного моделирования ТС на основе вихревой турбины с использованием параллельных вычислений на суперкомпьютерах;

- методики моделирования вихревых турбин и систем «двигатель - пневмо-турбостартер внедрены в рабочий процесс группы проектных работ компании ООО «ТЕСИС»;

- методика численного моделирования турбин с применением ПК FlowVision внедрена в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «поршневых двигателей» и используется для численных расчетов течения в лопаточных машинах агрегатов наддува ДВС.

Апробация работы. По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

- на международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети интернет: суперкомпьютерные центры и задачи», Новороссийск, Абрау-Дюрсо, 20-25 сентября 2010 г.;

- на XX международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, МГУ им. Ломоносова, 8-13 апреля 2013 г.;

- на международном форуме «Инженерные системы-2013», Москва, международный информационно-выставочный центр «ИнфоПространство», 15-16 апреля 2013 г.;

- на XIX школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», Орехово-Зуево, Московский государственный областной гуманитарный институт, 20-24 мая 2013 г.;

- на XVIII международной конференции по вычислительной механике и современным программным системам, Алушта, ОУЦ МАИ «Алушта», 22-31 мая 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них в изданиях по перечню ВАК РФ – 3.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Общий объем работы 133 страницы, включая 114 страницы основного текста, содержащего 53 рисунка, 8 таблиц. Список литературы включает 89 наименований на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность применения перспективных ТС и использования численных методов газодинамического расчета для моделирования агрегатов двигателя. Дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе приведен аналитический обзор работ, посвященных вопросам пуска двигателя и численным методам их моделирования. Показано, что применение экспериментальных методов исследования становится менее конкурентоспособным по сравнении с численным моделированием. Проанализированы существующие методы и системы пуска двигателей, в том числе подробно рассмотрены преимущества и недостатки существующих пневматических стартеров. Показана значимость и актуальность разработки ТС и совершенствования методов моделирования систем «двигатель–

турбостартер». Показаны преимущества перспективного вихревого турбостартера над другими применяемыми в данный момент стартерами.

На основании анализа текущей ситуации в области применения стартерных систем и их моделирования были сформулированы задачи настоящей работы:

1. Адаптировать программный комплекс FlowVision для решения стационарных и нестационарных задач с вихревым течением.
2. Выполнить тестовые исследования с целью проверки адаптированного комплекса на базе эксперимента с газодинамическим диодом – эквивалент турбины с остановленным ротором – и эксперимента с вихревой турбиной.
3. разработать методику расчета вихревого турбостартера с помощью FlowVision и выполнить численное моделирование течения в турбине стартера на режиме минимальных пусковых оборотов двигателя. Сравнить стационарное решение с результатами эксперимента.
4. Разработать методику расчета динамики работы системы «поршневой двигатель – турбостартер».
5. Выполнить моделирование системы ЯМЗ 8421 – вихревой турбостартер. Показать возможность применения вихревого турбостартера для пуска двигателя.

<u>Во второй главе</u> дается описание технологии и основных расчетных соотношений, используемых для моделирования 3D-газодинамических процессов с помощью программного комплекса FlowVision. В основе данной программы лежит метод конечных объемов. Как и в других методах сквозного счета с фиксированной сеткой в МКО расчетная область с определенным шагом по пространству Δx, Δy, Δz разбивается на непересекающиеся объемы – ячейки с центральными узлами (Рис. 1). Система исходных уравнений газовой динамики, представляющая собой в общем случае совокупность уравнений конвективно-диффузионного переноса, может быть записана в обобщенной дифференциальной форме:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(\vec{v} f) = \nabla(D \nabla f) + Q, \qquad (1)$$

где f – рассчитываемая переменная, $\vec{v}$ - вектор скорости, D – коэффициент диффузии, Q – источниковый член.

Уравнения (1) интегрируются по каждому контрольному объему (i – ячейке) расчетной сетки и по отрезку времени от $t = t^n$ до $t = t^{n+1}$ ($t^{n+1} - t^n = \Delta t$ – шаг расчета по времени), и в случае отсутствия дополнительного источника Q переменной f можно записать:

$$\int_{V_i} f dV\Big|_{t^{n+1}} - \int_{V_i} f dV\Big|_{t^n} + \int_{\Delta t} \oint_{A_i} f \vec{v} dA dt = \int_{\Delta t} \oint_{A_i} D \nabla f dA dt, \qquad (2)$$

где V_i – объем ячейки, $A_i = A_{ei} + A_{wi} + A_{ni} + A_{si} + A_{hi} + A_{li}$ – ее поверхность (сумма площадей всех граней).

В конечно-разностной форме уравнение (2) представляется в виде:

$$V_i\left(f_i^{n+1} - f_i^n\right) + A_{ei}F_{ei} + A_{wi}F_{wi} + A_{ni}F_{ni} + A_{si}F_{si} + A_{hi}F_{hi} + A_{li}F_{li} = 0. \qquad (3)$$

Здесь f^{n+1} и f^n – осредненные значения этой переменной по объему i –

ячейки в моменты времени t^{n+1} и t^n соответственно, в частности

$$f_i^n = \int_{V_i} f dV\Big|_{t^n}, F_{ei} = \int_{\tau} \left(f\vec{v} + D\nabla f \right) dt \text{ -} \qquad (4)$$

осредненная плотность потока рассчитываемой переменной f через грань A_{ei}. Аналогично записываются плотности потока параметра через грани w, n, s, h и l. При записи дифференциальной формы (1) и последующих в качестве переменной f имеется в виду любая переменная, характеризующая состояние среды, например, плотность ρ. Ее значение в узловой точке P рассматриваемого объема есть ее среднее, т.е. удельное значение в объеме V. Такая обобщенная форма записи уравнений для различных физических процессов позволяет использовать общий решатель СЛАУ (систем линейных уравнений).

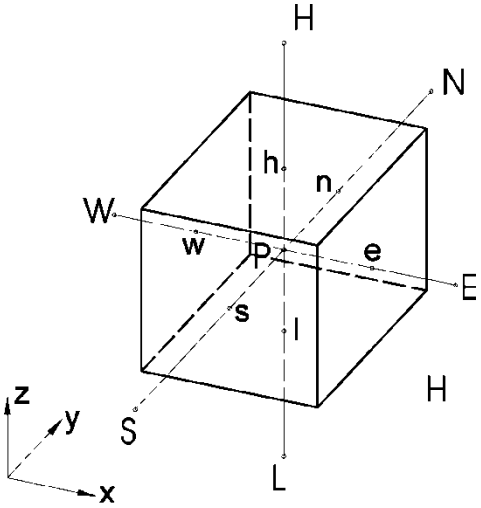


Рис.1. Расчетная ячейка МКО

В программном комплексе FlowVision применяется прямоугольная адаптивная локально измельчаемая сетка (АЛИС). В свободной части расчетной области размещается прямоугольная неравномерная сетка. Если же ячейка сетки пересекается элементом границы, то она делится на 8 равных ячеек. Далее, если необходима дальнейшая детализация геометрии, деление («адаптация» в терминологии FlowVision) каждой получившейся ячейки повторяется. На Рис. 2 продемонстрирована адаптация ячейки до 3 уровня. Ячейки системы АЛИС (в отличие от структурированных и неструктурированных мультиблочных) имеют переменное количество соседей – в трехмерном случае по грани с ячейкой могут соседствовать либо одна, либо четыре соседа. Данное обстоятельство затрудняет реализацию численных методов, но зато обеспечивается большая скорость генерации сетки и уменьшается потребление оперативной памяти по сравнению неструктурированными сетками. Также при автоматической генерации АЛИС не появляются «плохие ячейки», которые имеют слишком большие отношения площадей граней.

При моделировании зазоров во FlowVision используется аналитическая модель зазоров. Данная модель предполагает, что в зазоре между двумя стенками имеет место течение Пуазейля. При этом сопротивление в зазоре рассчитываются аналитически, а сам зазор не разрешается расчетной сеткой, что позволяет существенно экономить расчетную сетку. В задачах с вихревыми турбинами зазоры образуются между лопатками ротора и отсекателем статора, также между торцом ротора и статора.

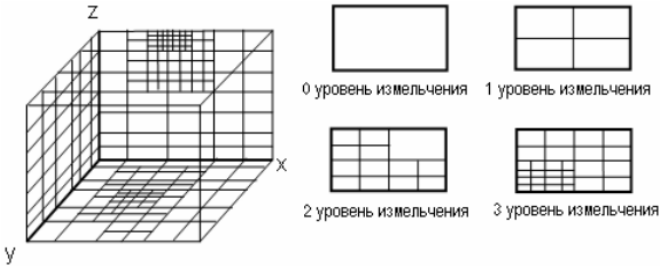


Рис. 2. Адаптивная локально измельченная сетка. Измельчение ячеек на несколько уровней

Как правило, для моделирования задач с роторами и стартерами применяют технологию скользящих сеток и расчет подобласти с ротором проводится во вращающейся системе координат. Данный подход позволяет отказаться от ресурсоемкого перестроения расчетной сетки на каждом шаге по времени, однако не совместим с технологией модели зазора, применение которой необходимо из-за отсекателя.

Для моделирования движущихся объектов в таком случае применяется более сложная и менее эффективная, чем скользящие сетки, технология подвижных тел. В данном случае поверхность тела перемещается в пространстве на каждом шаге по времени, а расчетная сетка, пересекаемая поверхностью, также на каждом шаге перестраивается. Вытесненный объем из ячеек перераспределяется по соседним ячейкам согласно закону сохранения импульса и массы. Данная технология может быть совместно использована с моделью зазора FlowVision, что является существенным преимуществом при решении задач течения газа в вихревых турбинах.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования газодинамических диодов и вихревой турбины с целью проверки применимости программного комплекса FlowVision для решения задачи течения газа в вихервом компрессоре.

Геометрия изогнутого лопаточного газодинамического диода аналогична рабочему объему вихревой турбины. Сразу проводить отработку методики расчета непосредственно на модели вихревой турбины было бы слишком ресурсоемко. По этой причине первоначальные разработка и тестирование методики проводились на модели изогнутого газодинамического диода, структура течения в котором (Рис. 3) аналогична структуре течения в рабочем объеме вихревой турбины. Верификация также проводилась и для прямого клапана. Были выработаны рекомендации по расчетной сетке, выбору граничных условиях и размерам расчетной области.

Численное исследование двух конструкций газодинамического диода – прямой и изогнутый диоды – а также сравнение этого исследования с экспериментальной продувкой (Рис. 4) показало корректность и обоснованность использования выбранных моделей, сеток и методики в целом. Эксперимент по продувке диодов проводился Лепехой А.И. в МГТУ им. Баумана. Как показали эксперименты и численное моделирование, диодность изогнутого канала с расположением лопаток на внешнем радиусе выше, чем прямого. Исследование течения в газодинамических диодах имеет само по себе отдельный практический и научный интересы.

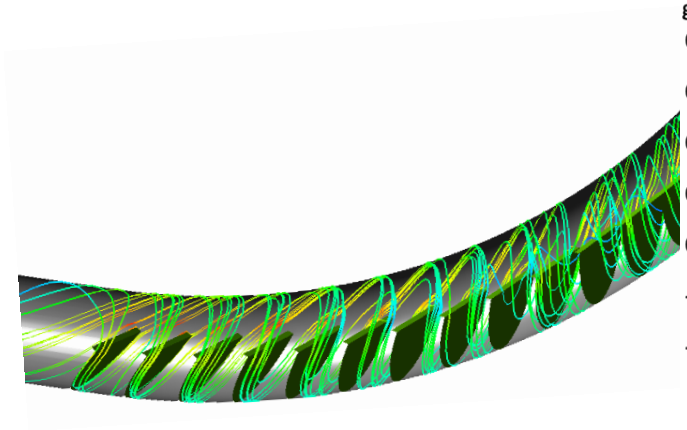


Рис.3. Линии тока в изогнутом диоде

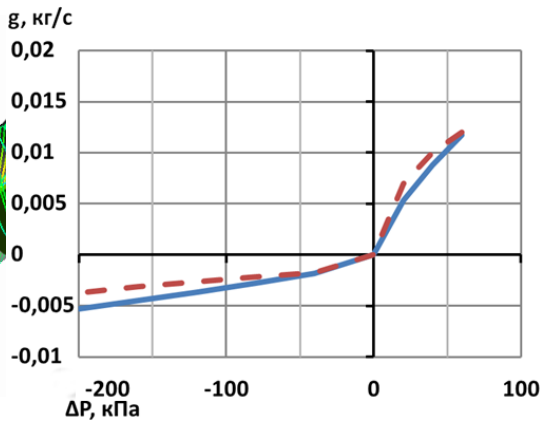
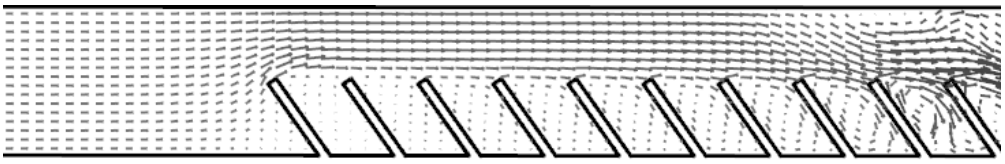


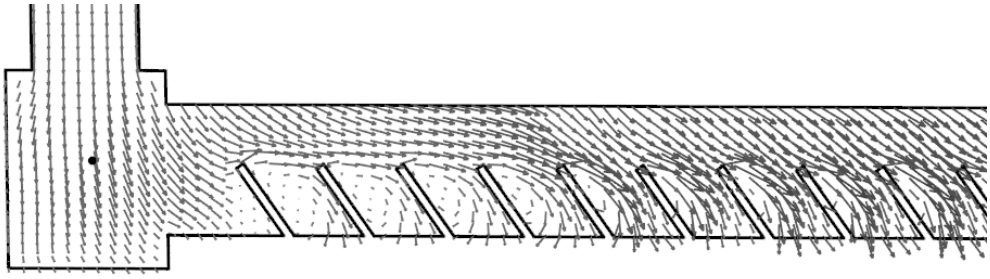
Рис.4. Зависимость расхода воздуха от перепада давления.

- моделирование
- эксперимент

При анализе результатов была дана и проверена рекомендация по совершенствованию газодинамических диодов. Поток, встречая на своем пути первую лопатку, перескакивает несколько последующих лопаток (Рис. 5 а) и лишь затем вовлекается в спиралевидное вихревое течение. Первые лопатки, таким образом, не вносят свой вклад в вихреобразование. Введение предварительной закрутки на входе (например, с помощью эксцентрично расположенного подводящего канала, перпендикулярного оси диода) или специальные геометрические параметры первых лопаток позволят повысить удельную эффективность диода (Рис. 5 б). Предварительная закрутка потока перед лопатками была применена в конструкции турбостартера, рассмотренного в главе 4.



а)



б)

Рис. 5. Вектора скорости в прямом диоде в закрытом состоянии:

а) с закруткой потока на входе; б) без закрутки потока на входе

Для проверки применимости программного комплекса для моделирования вихревых турбин и для отладки методики расчета вихревых турбин проводился численный эксперимент по исследованию течения в вихревой односекционной турбине (Рис. 6). Сравнение численных результатов с экспериментом, проведенным в МГТУ им. Баумана Сергеевым В.Н., представлено на Рис. 7. Как и в эксперименте, было получено, что оптимальный угол наклона лопаток – 35 градусов, и чем выше частота вращения, тем эффективнее использование большего угла наклона, что связано с меньшим рассогласованием направления вихревого движения потока в свободном и межлопаточном каналах. Данный угол установки лопаток был использован в конструкции турбостартера, рассмотренного в главе 4.

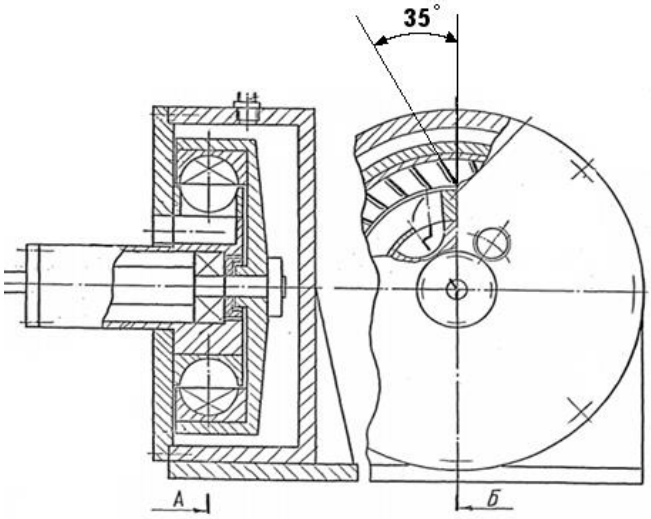


Рис.6. Экспериментальная односекционная вихревая турбина

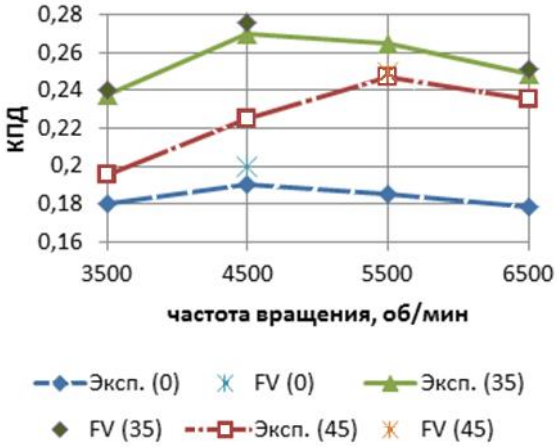
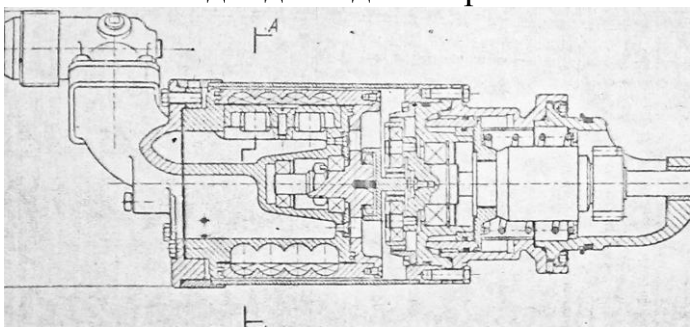


Рис.7. Адиабатный КПД турбины. Экспериментальные и численные результаты

<u>В четвертой главе</u> приводятся результаты стационарного моделирования трехмерной модели вихревой четырехсекционной турбины стартера (Рис.8) на номинальном режиме. Турбина была изготовлена и испытана ЯМЗ по результатам разработок кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана. В основу методики моделирования легли проверенные на газодинамическом диоде модели и решения.



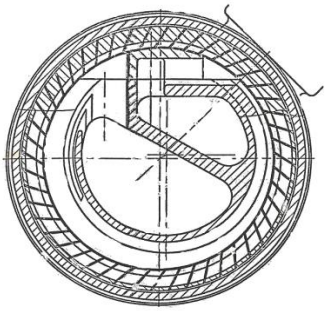


Рис. 8. Сечения вихревого турбостартера

В процессе моделирования турбины был выработан ряд рекомендаций по постановке задачи и выполнению расчетов во FlowVision.

Ротор и статор образуют расчетную область сложной формы (Рис. 9). С одной стороны простые и гладкие крупные объемы подводящего и отводящего каналов, а также свободный канал, с другой – сложная поверхность ротора, загроможденная большим количеством тонких лопаток. Для получения оптимальной размерности расчетной сетки необходимо использовать сравнительно грубую начальную сетку и локальную адаптацию по поверхности тороидальных каналов и лопаток. Вариант построения расчетной сетки приведен на Рис. 10. В результате серии стационарных расчетов была получена зависимость момента на валу ДВС от перепада давления на турбине. Результаты моделирования показали хорошее согласование с экспериментальными исследованиями (Рис.12). Большой объем численных экспериментов с вихревой турбиной в программном комплексе FlowVision позволил сформулировать ряд рекомендаций, направленных на повышение эффективности численных экспериментов и улучшение точности результатов.

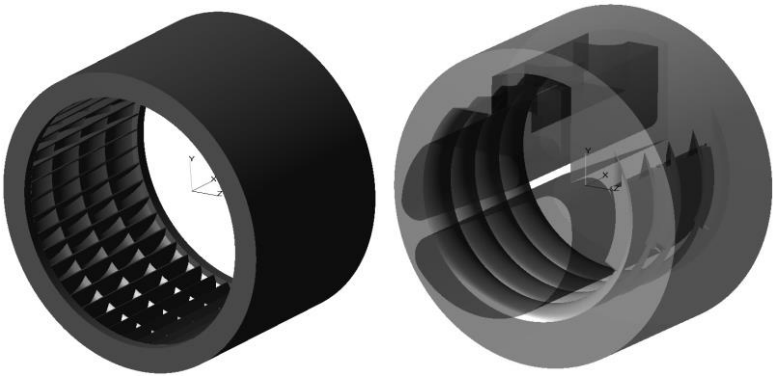


Рис. 9. Геометрическое представление ротора и статора (при визуализации модели статора использованы полупрозрачные стенки)

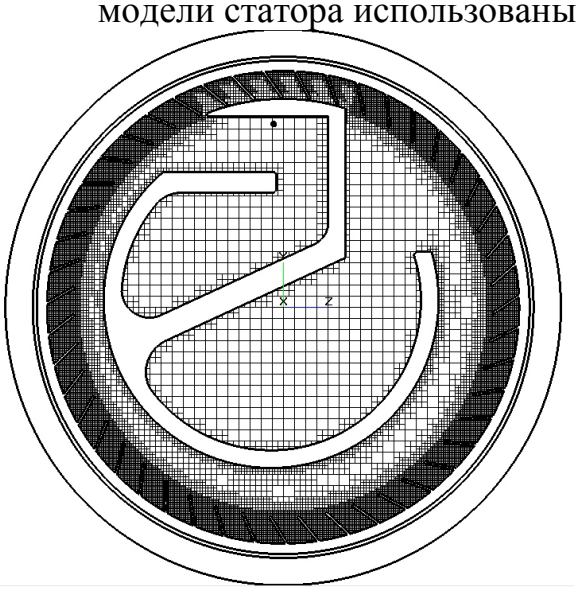


Рис. 10. Расчетная сетка

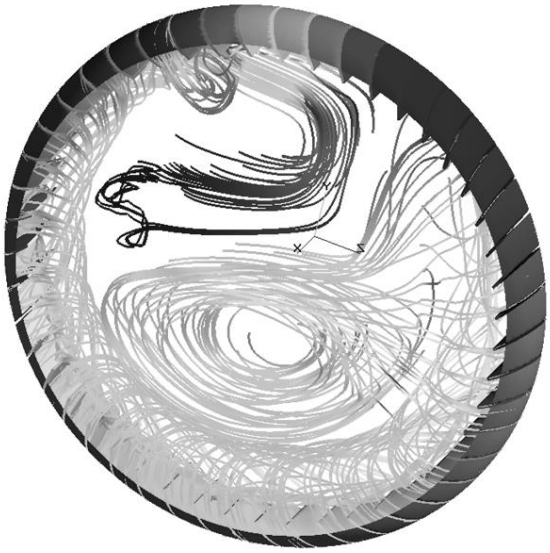


Рис.11. Линии тока в секции турбины

При моделировании турбины на номинальном режиме (перепад давления порядка 0,6 МПа), если сразу задать номинальную скорость вращения ротора, возникают высокие градиенты физических величин и численное ре-

шение уравнений не сходится. Так как в силу сложности вихревого течения (Рис. 11) не представляется возможным задать достаточно точно начальные приближения скорости и давления во всем объеме, необходимо начать расчет с плавным изменением частоты вращения ротора с нуля до номинального значения, например:

$$\begin{cases} i < 100: \; n = i \cdot 6000/100 \\ \quad i \geq 100: \quad n = 6000 \end{cases}, \qquad (5)$$

где i – номер текущей итерации, n – скорость вращения об/мин.

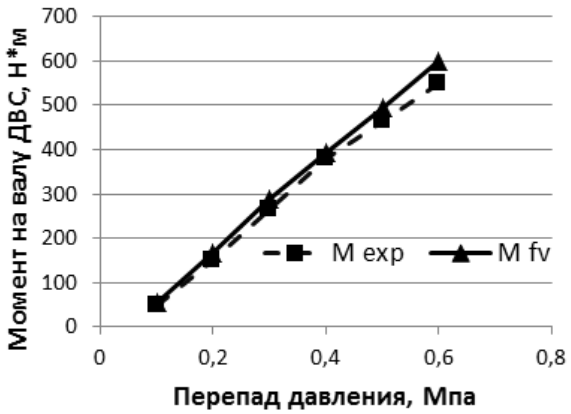


Рис. 12. Сравнение эксперимента и численного моделирования

Во FlowVision локальное измельчение сетки по поверхности ротора остается, даже если поверхность ротора в процессе вращения покинула пространство измельченных (проадаптированных) ячеек. Для их укрупнения с целью экономии сетки возможно применять автоматическую адаптацию сетки типа «слитие». Однако было показано, что применение такой адаптации приводит к большему расходу вычислительных ресурсов, чем применение избыточного измельчения сетки на всем пути следования ротора.

В результате расчетная сетка насчитывала порядка 5 миллионов ячеек. Для вычисления с таким количеством ячеек требуется большой объем оперативной памяти, недоступный на обычных компьютерах. Все численные эксперименты проводились на суперкомпьютере «Ломоносов» вычислительного комплекса МГУ. Важным достоинством суперкомпьютеров является не только возможность решать задачи большой размерности, но и возможность запускать одновременно множество задач средней размерности одновременно. Было проведено множество численных экспериментов и определены оптимальные параметры запуска решателей и настроек проекта во FlowVision для достижения максимальной эффективности решения задач течения газа в вихревых турбинах с использованием именно суперкомпьютеров.

<u>В пятой главе</u> разработана методика динамического моделирования системы двигатель-стартер на примере двигателя ЯМЗ-8421, в котором электростартерная система была заменена на пневмостартерную с вихревой турбиной.

Средний момент сопротивления двигателя в процессе пуска представляется в виде нескольких составляющих:

$$\mathrm{M_{с.ср}} = \mathrm{M_{г.ср}} + \mathrm{M_{т.ср}}, \qquad (6)$$

где Мс.ср – средний момент сопротивления, Мг.ср= средний момент газовых сил, Мт.ср- средний момент трения.

$$\mathrm{M_{г.ср}} = 390\, V_h\left(\varepsilon + 6\sqrt{\delta}\right), \qquad (7)$$

где 390 – размерный коэффициент, кг/($с^2$м); V_h – рабочий объем, ε – степень сжатия, δ – коэффициент неравномерности вращения.

Момент сил трения существенно зависит от степени износа деталей двигателя, от точности изготовления деталей и от множества эксплуатационных факторов. В работе Квайта С.М., Менделевича Я.А. и Чижкова Ю.П. «Пусковые качества и системы пуска автотракторных двигателей» (М.: Машиностроение, 1990. 256 с.) предлагается следующая формула, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными:

$$М_{т.ср} = К\,А\,V_h \rho \nu \omega_{ср}(1 + \frac{\delta^2}{8}), \qquad (8)$$

где К=1-1.2 – коэффициент, отражающий потери на привод агрегатов, А – параметр, отражающий конструктивные особенности кривошипно-шатунного механизма и цилиндро-поршневой группы, ν – вязкость масла, ωср – средняя на цикл частота вращения коленчатого вала, δ – коэффициент неравномерности.

$$A = \frac{1}{\psi_п}\frac{H_п}{D_ц}\frac{h_п}{D_ц} + \frac{2}{\psi_ш}\left(\frac{d_ш}{D_ц}\right)^3 \frac{l_ш}{d_ш}\frac{D_ц}{h_п} + \frac{2}{\psi_к}\left(\frac{d_к}{D_ц}\right)^3 \frac{l_{кΣ}}{d_к z_ц}\frac{D_ц}{h_п}, \qquad (9)$$

где ψ – относительные зазоры между юбкой поршня и цилиндром, в шатунных и коренных подшипниках коленчатого вала, $h_п$ – ход поршня, $D_ц$ – диаметр цилиндра; $H_п$ – высота поршня; d – диаметры коренных и шатунных шеек; z – число цилиндров; l – длины коренных и шатунных шеек.

В формулу момента трения (8) входит вязкость. При этом у моторных масел вязкость меняется в очень широких пределах в зависимости от температуры. В начале прокручивании коленчатого вала момент сил трения резко возрастает, затем уменьшается и постепенно стабилизируется на определенном уровне, зависящем от установившейся частоты вращения и вязкости масла. При этом, в зависимости от вязкости, получаются существенно разные моменты сопротивления.

Теплота, выделяющаяся в подшипнике за бесконечно малый промежуток времени dτ , выражается через момент сил трения в двигателе:

$$dQ_{тр} = M\,d\phi = M\omega\ \ d\tau, \qquad (10)$$

где М – момент сил жидкостного трения в подшипнике, Н*м.

Увеличение температуры (без учета теплопередачи в окружающую среду):

$$dT = \frac{dQ}{c_м m_м} = \frac{2\,M\,\omega\,d\tau}{c_м \rho \pi d^2 l \psi}, \qquad (11)$$

где $c_м$– удельная теплоемкость масла; $m_м$=ρπd^2 lψ/2 – масса масла между трущимися поверхностями.

При расчете изменения температуры масла необходимо также учитывать теплообмен с окружающей средой. Тогда на нагрев масла трением в подшипниках придется следующее количество теплоты:

$$Q_м = Q_{тр} - Q_р\ . \qquad (12)$$

Изменение теплоты, отдаваемой в окружающую среду можно выразить через коэффициент теплоотдачи α, разницу температур окружающей среды To и масла T и площадь поверхности теплоотдачи S:

$$dQ_{\text{р}} = \alpha\,(T - T_0)\,S\,d\tau\ . \qquad (13)$$

Тогда количество теплоты, затрачиваемое на нагрев масла:

$$dQ_{\text{м}} = (M\omega\ -\ \alpha\,(T - T_0)\,S)\,d\tau\,. \qquad (14)$$

Приращение температуры за время dτ:

$$dT = \frac{2\,(M\omega\ -\ \alpha\,(T - T_0)\,S)d\tau}{c_{\text{м}}\rho\pi d^2 l\psi}. \qquad (15)$$

Для электростартерных систем существует эмпирическая формула, отражающая характер изменения скорости вращения коленчатого вала в зависимости от электромеханической постоянной стартерного электрического привода. Для ТС систем не существует столь богатой экспериментальной базы и расчет изменения вязкости масла в процессе пуска необходимо выполнять одновременно с газодинамическим расчетом вращения ротора турбостартера. В этом случае dτ – шаг по времени в CFD комплексе, Мтр – рассчитывается по формуле (8) для предыдущего шага по времени, ω – скорость вращения коленчатого вала, dT рассчитывается по формуле (15). Для нового шага по времени Мтр рассчитывается исходя из приращения dT (и соответственно приращения вязкости масла) на предыдущем шаге по времени. На Рис.13 приведена схема разработанной методики моделирования системы «двигатель-турбостартер» с использованием FlowVision.

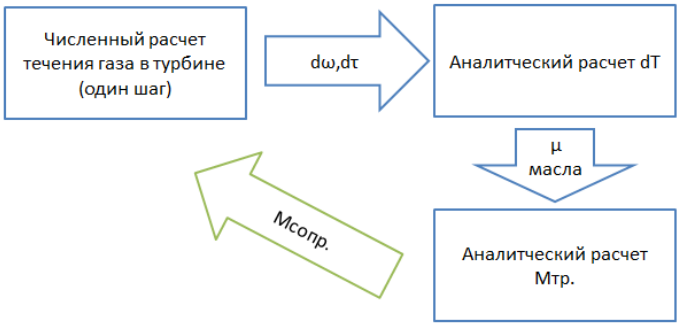


Рис. 13. Элементарный цикл метода моделирования динамической системы «двигатель – турбостартер»

Было проведено моделирование системы вихревой турбостартер – двигатель ЯМЗ 8421. Средний момент сопротивления приводился к валу турбины и задавался во FlowVision как момент внешних сил. Момент инерции двигателя приводился к оси турбины и добавлялся к моменту инерции вращающихся частей турбостартера. Скорость вращения ротора турбины задавалась не постоянной, а менялась под действием гидродинамических сил в процессе расчета во FlowVision. Температура окружающей среды и масла задавалась равной 273 К. На Рис. 14 приведена соответствующая зависимость частоты вращения ротора турбины от времени.

Пунктиром на Рис. 14 показана минимальная частота вращения ротора, необходимая для надежного пуска двигателя ЯМЗ 8421. Таким образом, продемонстрирована возможность пуска двигателя ЯМЗ 8421 с помощью вихре-

вого пневмо-турбостартера. На Рис. 15 показано изменение среднего момента сопротивления сил трения. В начальный момент времени при температуре масла 0℃ средний момент сил трения быстро возрастает в связи с ростом частоты вращения вала. Затем рост замедляется и останавливается, т.к. начинает прогреваться масло, соответственно падает вязкость. Т.к. кривая зависимости вязкости от температуры у масла имеет существенно нелинейный характер, момент сопротивления начинает снижаться, а скорость вращения быстро растет.

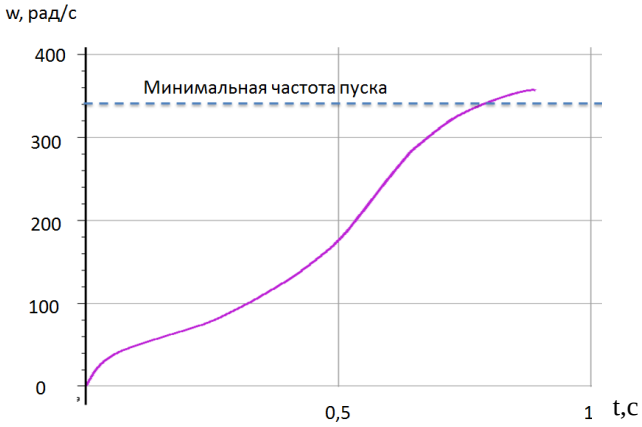


Рис.14. Изменение частоты вращения ротора турбины

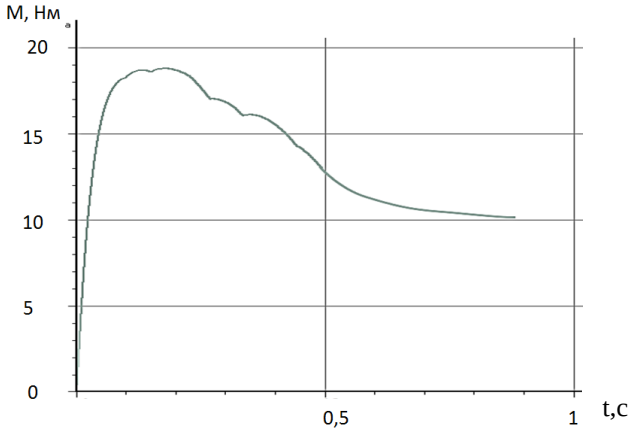


Рис. 15. Изменение момента сил сопротивления трения, приведенного к оси турбины

В случае, если конструктивные, технологические и прочностные требования позволяют варьировать величину зазора в подшипниках, их длину и диаметр, можно учитывать их положение в знаменателе формулы (15) при проектировании двигателя. Уменьшение их значений позволит улучшить пусковые качества двигателя.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика для численного расчета вихревой турбины с помощью программного комплекса FlowVision. Даны рекомендации по настройке математической модели, выбору расчетной сетки, специальных моделей и параметрам расчета при запуске на суперкомпьютерах. Рекомендации позволяют выполнять моделирование, максимально эффективно используя ресурсы вычислительных компьютерных кластеров и функциональные возможности отечественного программного комплекса FlowVision.
2. Методика протестирована на задачах течения газа в газодинамическом лопаточном диоде, который является моделью вихревой турбины с неподвижным рабочим колесом. Предложено и обосновано численным экспериментом конструктивное изменение для повышения эффективности дио-

да. Показано хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными данными.

3. Данная методика протестирована на задаче о работе вихревой односекционной турбины. Показано хорошее согласование результатов расчетов с экспериментальными данными. Полученные закономерности подтверждают выводы эксперимента и демонстрируют возможность применения разработанной методики для доводки вихревых турбин.
4. Проведено численное моделирование рабочего процесса четырехсекционной вихревой турбины на суперкомпьютере «Ломоносов», спроектированной для использования в составе пневматической стартерной системы. Продемонстрировано хорошее согласование с экспериментом и показана применимость разработанной методики для моделирования вихревой турбины на номинальном режиме, соответствующем требованиям надежного пуска.
5. Разработана методика моделирования динамической системы «двигатель – турбостартер». Предложенная методика позволяет моделировать процесс пуска ДВС пневматическим вихревым турбостартером и другими типами пневматических силовых установок. Методика может быть использована для улучшения пусковых качеств конкретных двигателей и турбостартеров как по отдельности, так и в связке.
6. Методика моделирования динамической системы реализована с помощью программного комплекса FlowVision и проведено моделирование пуска двигателя ЯМЗ 8421 с помощью четырехсекционной вихревой турбины. Продемонстрирована принципиальная возможность пуска двигателя с помощью вихревого турбостартера. Минимальная пусковая частота достигается стартером за 0,9 с, при этом максимальный момент сопротивления двигателя достигает 550 Нм. Полученные результаты будут использованы для последующей доводки конструкции турбостартера.

<u>Основные результаты диссертации изложены в 6 работах:</u>

1. Гришин Ю.А., Москалев И.В. Численный расчет вихревого пневмостартера дизельного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение.2012. № 7.С. 37-47. (0,7 п.л./0,5 п.л.)

2. Гришин Ю.А., Москалев И.В., Лепеха А.И. Численное моделирование течения в газодинамических диодах // Известия высших учебных заведений. Серия Машиностроение. 2012.№ 2.С.13-18. (0,4 п.л./0,3 п.л.)

3. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-HPC / С.В. Жлуктов [и др.] // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11. С. 234-245. (0,8 п.л./0,1 п.л.)

4. Москалев И.В., Гришин Ю.А. Особенности моделирования вихревой турбины во FlowVision // Инженерные системы -2013: Труды международного форума. Москва, 2013.С.80-85. (0,4 п.л./0,35 п.л.)

5. Решение задач вычислительной гидродинамики на суперкомпьютере «Ломоносов» с помощью FlowVision / А.А. Аксенов [и др.] // Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи: Труды Международной суперкомпьютерной конференции; 20-25 сентября 2010 г., Новороссийск. С.352-357. (0,7 п.л./0,1 п.л.)

6. Гришин Ю.А., Москалев И.В. Моделирование газодинамических процессов в вихревом турбостартере с применением суперкомпьютеров // Материалы XVIII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013), 22-31 мая 2013 г., Алушта. С.552-553. (0,25 п.л./0,2 п.л.)