



Annular jet - вихревые структуры в кольцевой струе. Расчет методом крупных вихрей.

Грани гранта

Подготовила Ольга КОЛЕСОВА

В зоне турбулентности

Теплофизики дают импульс развитию цифровой энергетики

► Словосочетание «цифровой двойник» за последнюю пару лет прижилось в лексиконе и автомобилестроителей, и физиков-ядерщиков. В 2018 году специализирующаяся на исследованиях рынка информационных технологий консалтинговая компания Gartner провозгласила повсеместное внедрение цифровых двойников стратегическим трендом технологического развития. В этой статье речь пойдет об отрасли, ставшей одним из лидеров цифровизации, - энергетике. Технологии цифровых двойников в энергетике позволяют разрабатывать и обслуживать так называемые умные сети, без которых невозможно широкое внедрение экологически чистых и возобновляемых источников энергии. Интеллектуальные системы управления с использованием цифровых двойников помогут увеличить ресурс работы энергооборудования и сократить эксплуатационные затраты. По оценкам Международного энергетического агентства (IEA) внедрение цифровых технологий в электроэнергетике позволило бы сэкономить свыше 5% от стоимости производства электроэнергии. Тем не менее повсеместной цифровизации энергетики пре-

пятствуют нерешенные фундаментальные проблемы. В рамках проекта Российского научного фонда «Эффективные методы интеллектуального управления физико-химическими процессами в современных энергетических технологиях» над их решением ведет работу коллектив лаборатории моделирования энергетических процессов Института теплофизики СО РАН (ИТ СО РАН).

распределенной генерацией электроэнергии в сетевых энергетических системах, элементами которых являются единицы энергетического оборудования. Именно они представлены цифровыми двойниками. При этом цифровые двойники собственно энергетического оборудования разрабатываются, исходя из простых, как правило, балансных моделей протекающих в них технологических

тематические модели упомянутых явлений зачастую сложны для интеграции в цифровой двойник (как, например, вихреразрешающие модели турбулентности), а то и вовсе отсутствуют. Отсюда возникла идея восполнить недостатки современных математических моделей сложных турбулентных и реагирующих течений за счет применения адаптивных самообучающихся методов управления, в частности, нейросетевых технологий и машинного обучения. Интеллектуальное управление повышает эффективность технологических процессов, происходящих в энергетическом оборудовании, и дает дополнительный толчок развитию цифровой энергетики.

Надо сказать, идея усовершенствовать современные модели возникла не на пустом месте - у

потоке в проточном тракте гидроэнергетического оборудования, волновых явлений в многофазных средах. Разработаны и развиваются современные оптические методы диагностики реагирующих потоков, позволяющие, в частности, определять локальную температуру и состав газа с помощью регистрации интенсивности лазерно-индуцированной флуоресценции и различных видов рассеяния света. Кроме того, ученые ИТ СО РАН разработали ряд математических алгоритмов обработки данных панорамных измерений поля скорости и концентрации в потоках для получения количественной информации, проливающей свет на механизмы процессов турбулентного переноса. Наиболее приближенным к будущему проекту РНФ было направление исследований, где в качестве модельного объекта выбрали хорошо известную гидродинамическую задачу обтекания цилиндра. Несмотря на длительную историю изучения, она до сих пор таит в себе много неожиданностей, являясь простым примером сложного турбулентного течения. Сотрудники лаборатории с помощью длительных высокопроизводительных численных расчетов обтекания цилиндра подтвердили возможность модельного описания давно открытого экспериментального факта снижения аэродинамического сопротивления объекта при периодическом вращении его вокруг своей оси.

- Эффект снижения сопротивления существенно зависит от частоты и амплитуды вращательных колебаний, определяющих сложный характер их влияния на турбулентный поток, - поясняет Д.Маркович.

“ Чтобы эффективно использовать нейросеть для управления турбулентным потоком, нужно знать его «чувствительные места».

- Новомодные слова «цифровой двойник» подразумевают, по сути, интегрированную в программное обеспечение физико-математическую модель объекта, позволяющую воспроизводить его поведение в реальных условиях эксплуатации, - комментирует руководитель лаборатории и проекта РНФ академик Дмитрий МАРКОВИЧ. - В успешном опыте внедрения цифровой энергетики основной акцент делается на интеллектуальном управлении

процессов. Между тем реальные процессы турбулентного тепло-массопереноса, горения, фазовых переходов и физико-химических превращений имеют сложный, неравновесный и многомасштабный характер. Упрощенное моделирование таких процессов равновесными балансными моделями может привести к существенным ошибкам, что способно свести на нет все конкурентные преимущества цифровой энергетики. Однако более адекватные физико-ма-

коллектива лаборатории имелись значительные достижения в области экспериментальных и численных исследований процессов, реализующихся в энергетическом оборудовании. Были получены уникальные фундаментальные результаты по исследованию трехмерной структуры потоков в вихревых камерах сгорания, изучению влияния кавитации на режимы обтекания гидрокрыльев, условий возникновения нестационарных пульсаций в закрученном

- Когда в 2019 году мы выиграли грант РНФ, это дало нам возможность вывести исследования на новый качественный уровень. Уже в ходе первого года работы был создан программный алгоритм управления турбулентным течением с обратной связью на основе машинного обучения, что потребовало синергии нейросетевого моделирования и методов вычислительной гидродинамики, реализованных с использованием параллельных вычислений. На основе этого алгоритма построен оптимальный регулятор, способный удерживать модельное течение в состоянии с минимумом аэродинамического сопротивления за счет управления фазой вращений цилиндра. Показано, что данный метод управления позволяет в несколько раз снизить уровень сопротивления. Аналогичные подходы, сочетающие методы машинного обучения и высокоразрешающее численное моделирование многомасштабных турбулентных течений, планируется применить к другим задачам, изучаемым в проекте. Но чтобы эффективно использовать нейросеть для управления турбулентным потоком, нужно знать его «чувствительные места», воздействием на которые можно добиться ощутимого эффекта. Поэтому одно из важных направлений проекта - детальный анализ устойчивости и восприимчивости течений, который позволяет выявить области наибольшей чувствительности к управляющим воздействиям.

Число фундаментальных и практических применений такого комплексного подхода к управлению потоками даже трудно себе представить: это исследования струйных течений смешивающихся газов, обтекания элементов гидромашин, в том числе в условиях кавитации, газовых завес тепловой защиты лопаток газовых турбин, течений газов и спреев в камерах сгорания газотурбинных установок и двигателей. По всем этим направлениям в рамках реализации проекта уже получен ряд новых экспериментальных и расчетных данных о гидроаэродинамических параметрах течений, структуре турбулентности, созданы новые математические модели, усовершенствованы экспериментальные методики. Неудивительно, что Объединенная двигателестроительная корпорация - давний партнер Института теплофизики и близких по профилю институтов СО РАН - сразу согласилась на софинансирование проекта. Партнером ИТ СО РАН в проекте РНФ стало АО «ОДК-Авиадвигатель» (Пермь) - головной исполнитель работ по созданию перспективных двигателей гражданского назначения (ПД-14 и ПД-35).

- Одна из критических технологий в таких проектах - технология создания малоэмиссионной камеры сгорания, развитие которой невозможно без всестороннего понимания протекающих там физико-химических процессов, - комментирует академик Д.Маркович. - Общеизвестным мировым трендом в решении подобных задач стало сочетание панорамной оптической диагностики и методов вихреразрешающего математического моделирования с



Аспирант Роман Толстогузов готовит эксперимент по оптическим измерениям структуры потока в модельной камере сгорания газовой турбины.

целью определения критических параметров и способов управления смещением, горением и концентрацией выбросов вредных веществ. В рамках данного проекта РНФ для лабораторий мирового уровня мы не только осуществляем фундаментальные исследования, но и работаем над созданием лабораторного прототипа камеры сгорания авиационного двигателя с возможностью современной оптической диагностики протекающих там процессов. Запланирован комплекс углубленных экспериментальных исследований, где смоделированные условия будут близки к реальным. Кроме того, планируется активное применение методов оптической диагностики распыла топлива форсунками с использованием самого современного обо-

уже не как у руководитель проекта РНФ, а как у директор Института теплофизики СО РАН.

- Дело в том, что в рамках национального проекта «Наука», безусловно, своевременного и актуального, предусмотрено 50-процентное обновление приборной базы ведущих научных и образовательных организаций. Опуская замечание о том, что ограничиваться категорией «ведущих» здесь ни в коем случае нельзя, иначе у остальных вообще не будет шансов догнать, я должен выразить свое несогласие с принципом доведения средств в рамках этого 50-процентного обновления. В регламентирующих документах добавлена фраза «из всех источников», которой не было ранее, при обсуждении самой концепции национального проекта, - возму-

Проект же по разработке методов интеллектуального управления в энергетических технологиях, наоборот, дает поводы для гордости - основной прогресс в работах, особенно связанных с использованием современных подходов нейросетевого моделирования, обеспечивают молодые сотрудники, которых в составе исполнителей более 70%.

- Говоря о преимуществах таких крупных проектов, как поддержка лабораторий мирового уровня, хочу особо отметить, что в их рамках у молодых сотрудников появляется возможность участвовать в значимых международных конференциях, где они могут из первых рук получить свежую научную информацию от ведущих ученых со всего мира, установить контакты, которые будут основой будущего

(на базе НИУ «МЭИ»). В июле 2020 года в Санкт-Петербурге планировалось проведение X Международной конференции Turbulence, Heat and Mass Transfer («Турбулентность и процессы тепломассопереноса»). Впервые за почти 30-летнюю историю конференции международный оргкомитет принял решение провести ее в России. Из-за эпидемии пришлось перенести мероприятие на 2021 год, но конференция все равно состоится, а в 2020-м мы, тем не менее, выполним свои обязательства по проекту и проведем осенью в Новосибирске школу молодых ученых, на которую, пользуясь случаем, хотим пригласить читателей газеты.

Прошел только первый год работы над масштабным проектом РНФ, способным повлиять на будущее российской энергетики. В планах коллектива лаборатории ИТ СО РАН - создание на основе искусственных нейронных сетей, машинного обучения и современных методов экспериментальной диагностики, дополненных физико-математическим и численным моделированием, новых технологий интеллектуального управления масштабными процессами турбулентного переноса в одно- и двухфазных потоках с химическими реакциями. Такие процессы происходят, напомним, в современной энергетике. Созданный в лаборатории моделирования энергетических процессов научно-технический задел позволит разработать идентичные цифровые двойники энергетического оборудования. Отсюда - прямой путь к экологичной и эффективной цифровой энергетике. ■

Созданный в лаборатории моделирования энергетических процессов научно-технический задел позволит разработать идентичные цифровые двойники энергетического оборудования.

рудования, в частности, немецкой системы SpraySpray, для измерения характеристик дисперсной фазы в аэрозолях и спреях и уникальных скоростных камер японского производства. Это оборудование удалось приобрести в рамках проекта РНФ, и оно не имеет аналогов в РФ.

Именно модернизация оборудования вызывает особое беспокойство у академика Д.Марковича

щается Д.Маркович. - В переводе с бюрократического языка это означает, что если наш институт приобретет оборудование из средств большого гранта РНФ на 15-20 миллионов рублей в год, то ровно столько же денег мы недополучим из национального проекта «Наука». Эта норма бьет по наиболее активным и успешным организациям.

плодотворного сотрудничества, - добавляет Д.Маркович. - Одной из задач нашего гранта является ежегодное проведение школы для молодых ученых. В 2019 году такую школу под названием «Современные методы диагностики потоков» (СМДП-2019) мы провели в рамках ежегодной конференции «Оптические методы исследования потоков» 24-28 июня в Москве