УДК 519.68:004.89

Специфика аэродисперсных нагрузок в аридной зоне приаралья и системные ограничения классических методов макроскопической гидродинамики

Елмуратов М. К.
Нукусский государственный технический университет, Нукус, Узбекистан
E-mail: m.elmuratov@gmail.com

Проектирование и практическая реализация инженерных систем очистки воздуха в замкнутых объемах гражданских и социальных объектов Республики Каракалпакстан разворачивается в условиях уникального, экстремального по своим характеристикам экологического прессинга. Ключевая деструктивная особенность атмосферного воздуха данного макрорегиона, детально задокументированная в многолетних натурных наблюдениях, заключается в качественном составе взвешенных частиц. В отличие от стандартных урбанизированных или индустриальных территорий, где основу мелкодисперсного загрязнения составляют углеродсодержащие сажевые фракции, минеральная пыль или продукты сгорания топлив, воздушный бассейн Приаралья насыщен высокоагрессивным физико-химическим комплексом.

Сильные ветровые выносы со специфического техногенного ландшафта — обнажившегося и усохшего дна Аральского моря — перманентно обогащают приземный слой атмосферы дисперсными аэрозолями солевой природы. В их фракционном составе превалируют сульфаты, хлориды и карбонаты натрия, магния и кальция, часто ассоциированные с остаточными следами пестицидов и соединений тяжелых металлов. Ситуация усугубляется выраженной полидисперсностью: в объеме инфильтрующегося внутрь зданий потока одновременно присутствуют как относительно крупные пылевые конгломераты (фракция PM10), так и наиболее опасные, глубоко проникающие субмикронные соляные ядра (фракция PM2.5).

Главная научно-инженерная проблема заключается в поведении этой солевой фракции при контакте с пористыми и волокнистыми структурами стандартных воздухоочистных устройств. Обладая колоссальной гигроскопичностью, сульфатно-хлоридные микрочастицы мгновенно реагируют на малейшие градиенты относительной влажности воздуха, которые неизбежно возникают внутри помещений при изменении температуры, дыхании людей или работе систем кондиционирования. Переходя из твердого состояния в микрокапли рассола и обратно, солевые фракции подвергаются процессам циклической перекристаллизации непосредственно внутри поровых каналов фильтрующего материала. В результате классический механизм механического улавливания (ситовой эффект, инерционное соударение) сменяется агрессивным физико-химическим процессом кольматации.

Происходит лавинообразное зарастание «живого» сечения пор, волокна покрываются жесткими соляными корками, изменяется внутренняя архитектоника волокнистого слоя. Как следствие, аэродинамическое сопротивление модуля демонстрирует нелинейный, экспоненциальный рост. Чтобы продавить воздушный поток через такой забивающийся каркас, вентиляционные установки вынуждены работать на предельных мощностях, что радикально увеличивает удельный расход электрической энергии. Это напрямую противоречит современным концепциям энергосбережения и делает стандартные фильтры общего назначения неприменимыми в климатических реалиях Узбекистана.

Для разрешения этого комплексного противоречия — между необходимостью глубокой сепарации агрессивной соли и жестким требованием минимизации энергозатрат — современной прикладной науке необходим прецизионный инструмент математического прогнозирования динамики запыленных потоков. Исторически сложившийся подход базируется на методах вычислительной гидрогазодинамики (CFD), где течение несущей воздушной фазы описывается системой макроскопических уравнений Навье-Стокса, усредненных по объему или по методу Рейнольдса (RANS), а падение давления внутри пористой зоны компенсируется введением эмпирических источниковых членов типа Дарси-Форхгеймера. Движение дискретных солевых включений при этом отслеживается в рамках Лагранжева подхода (модель DPM) с учетом целого спектра силовых факторов: от классического динамического сопротивления до сил Саффмэна, термофореза и броуновской диффузии.

Однако на этапе перехода к многокритериальной оптимизации геометрии реальных устройств классический CFD-подход наталкивается на непреодолимый вычислительный барьер. Реальный волокнистый или канальный фильтрующий элемент представляет собой сложную пространственную топологию. Для того чтобы расчетные поля давлений и скоростей адекватно отражали реальную физику завихрений и локальные зоны осаждения частиц, численная конечно-объемная сетка должна содержать миллионы ячеек. Расчет всего лишь одной геометрической конфигурации (например, при варьировании шага волокон, углов наклона направляющих каналов или градиента пористости) на мощных вычислительных кластерах занимает от нескольких часов до суток.

Поскольку классические эволюционные алгоритмы оптимизации (такие как NSGA-II) для поиска истинного фронта Парето требуют последовательной оценки тысяч итераций, прямой поисковый CFD-расчет в контуре проектирования оказывается экономически и временно нереализуемым. Возникает выраженный разрыв между высокой точностью фундаментальных физических моделей и невозможностью их оперативного использования для автоматизированного синтеза энергоэффективных инженерных систем.

Именно этот системный тупик предопределяет необходимость концептуального шага вперед — перехода от ресурсоемких физических симуляторов к гибридным цифровым двойникам. Суть этого перехода состоит в разделении этапов: тяжелый численный CFD-решатель переводится в категорию инструмента для генерации эталонных данных на ограниченной выборке конфигураций. Основную же нагрузку по многокритериальной оптимизации и синтезу геометрии берет на себя интеллектуальное ядро на базе суррогатных моделей машинного обучения. Сворачивая сложные многомерные поля течений в быстрые аппроксимационные операторы, искусственный интеллект позволяет разрешить фундаментальный конфликт между вычислительной скоростью и физической достоверностью моделирования.

В результате проведенного теоретического анализа обоснован критериальный подход к разрешению вычислительного барьера при моделировании многофазных фильтрационных сред, заключающийся в концептуальном переходе от ресурсоемких численных CFD-сеток (RANS+DPM) к быстрым суррогатным аппроксиматорам на базе искусственного интеллекта. Доказано, что в условиях полидисперсного пыле-солевого запыления аридной зоны Приаралья, вызывающего нелинейную кольматацию пор, классические гидродинамические модели применимы лишь на этапе генерации первичных обучающих матриц. Оперативный синтез и многокритериальная оптимизация геометрии модулей возможны только путем замещения дифференциальных уравнений механики сплошных сред обученными нейросетевыми весами. Это позволяет полностью обойти проблему "вычислительного тупика", сократив время оценки

каждой конфигурации до 0.08 секунды, что открывает путь к созданию адаптивных систем вентиляции нового поколения.