

# Комплексный подход к внедрению узлов учета на ТЭС в сложных гидравлических условиях с использованием ультразвуковых расходомеров



Статья посвящена решению критически важной проблемы – обеспечению высокой точности измерений расхода теплоносителя на действующих тепловых электростанциях (ТЭС) в условиях отсутствия стандартных прямых участков водовода для установки расходомеров. На основе комплексного CFD-моделирования (computational fluid dynamics) детально исследованы закономерности формирования поля осредненных скоростей турбулентного потока после колена 90°, а также разработаны практические методики оптимизации мест установки, количества и положения акустических лучей и алгоритмов обработки сигналов ультразвуковых расходомеров, позволяющие добиться минимальной погрешности в неидеальных условиях. Особое внимание уделено верификации моделей и перспективам создания цифровых двойников.

000 НКФ «Волга», г. Москва

Энергетическая и экономическая эффективность современной тепловой электростанции напрямую зависят от точности контроля технологических параметров. Измерение расхода теплоносителя – питательной, сетевой и циркуляционной воды – является основой для решения ряда ключевых задач: коммерческого учета, расчета фактического КПД турбоустановок и теплообменных аппаратов (конденсаторов, подогревателей), оптимизации режимных карт и оперативного выявления утечек.

Однако существующая инфраструктура многих ТЭС, особенно прошедших модернизацию, характеризуется высокой стесненностью монтажного пространства. Это делает физически невозможным обеспечение достаточно длинных прямых участков до и после измерительного створа, регламентированных стандартами (например, не менее 10–20 диаметров трубопровода до створа и 5 – после). Установка расходомеров вблизи препятствий (колен, тройников, задвижек и пр.) приводит к искажению сформированного профиля скорости, что становится причиной появления до-

полнительной систематической относительной погрешности, в некоторых случаях достигающей 10% и более.

Целью исследования является не только оценка принципиальной возможности применения ультразвуковых расходомеров в нестандартных гидравлических условиях, но и разработка комплексного инженерного подхода, включающего предиктивное моделирование, оптимизацию уста-

новки и интеллектуальную настройку для гарантированного обеспечения высокой точности измерений.

## Теоретические основы и вызовы эксплуатации на ТЭС

Принцип времяимпульсного метода и его уязвимости

подавляющее большинство современных ультразвуковых расходо-

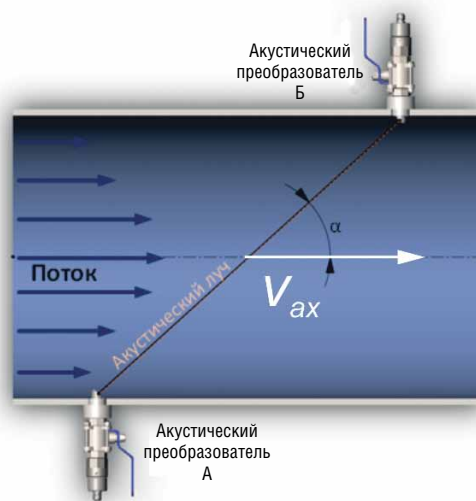


Рис. 1. Метод измерения



Рис. 2. Построение 3D-модели участка трубопровода с коленом 90°: а – исходные данные; б – расчетная сетка

меров жидкостей используют время-импульсный (времяпролетный, разностно-временной) метод. Его суть заключается в измерении разности времени ( $\Delta t$ ) прохождения ультразвукового импульса по так называемому акустическому лучу (линии между двумя пьезоэлектрическими преобразователями) по направлению течения потока ( $t_1$ ) и против ( $t_2$ ).

Величина средней скорости потока в проекции на ось водовода вдоль акустического луча ( $V_{ax}$ ) вычисляется по формуле:

$$V_{ax} = (L / (2 \cdot \cos\theta)) \cdot (1/t_1 - 1/t_2),$$

где:  $L$  – расстояние между преобразователями,  $\theta$  – угол установки преобразователей относительно оси трубопровода (рис. 1).

Ключевое допущение метода: предполагается, что проекция скорости вдоль акустического луча ( $V_{ax}$ ) на ось водовода однозначно связана со средней скоростью в поперечном сечении трубы ( $V_{cp}$ ) через некоторую функциональную зависимость. Эта функциональная зависимость однозначно определена только при равномерном течении жидкости.

В искаженном же потоке (например, после колена) эта функциональная зависимость нарушается. Появление поперечных составляющих осредненной скорости, связанных

с переформированием поля скоростей, а также асимметрии эпюры делает невозможным применение стандартных методов интегрирования. Данные измерений от одного или двух лучей не могут корректно описать реальный профиль, что и приводит к появлению значительной погрешности.

#### Особенности условий на ТЭС

**Требования к точности.** Погрешность в 1% при измерении расхода питательной воды на мощном энергоблоке может привести к существенным финансовым потерям из-за некорректного расчета КПД и перерасхода топлива.

**Эксплуатационные нагрузки.** Приборы работают при температурах до 200–300 °С и давлениях до 20–30 МПа, в условиях вибрации, что предъявляет высокие требования к конструкции преобразователей и надежности электроники.

**Цена ошибки.** Выход расходомера из строя или его некорректные показания могут привести к нарушению режима работы всего энергоблока, дорогостоящим простоям и даже аварийным ситуациям.

#### Методология исследования: от виртуальной модели к достоверному результату

Для построения профиля потока в зонах со сложными гидродина-

мическими условиями (рис. 2) использовалось CFD-моделирование.

#### Построение и настройка модели

**Геометрия и сетка.** На первом этапе была создана точная 3D-модель участка трубопровода с коленом 90° в горизонтальной плоскости. Особое внимание было уделено построению расчетной сетки. В пристенной области формировались слои призматических элементов для максимально точного разрешения в пограничном слое, что критически важно при моделировании турбулентного течения. В зоне ядра потока были использованы гексаэдральные ячейки, которые хорошо адаптируются к сложной геометрии. Проводился тест на независимость от сетки для исключения влияния ее размера на результат.

**Модель турбулентности.** Как показал предварительный анализ, наиболее адекватные результаты для течений с отрывом и в криволинейных каналах демонстрирует двухпараметрическая модель Menter's SST  $k-\omega$  (shear stress transport). Она сочетает точность стандартной  $k-\omega$ -модели вблизи стенок с устойчивостью  $k-\epsilon$ -модели в ядре потока, что особенно важно для прогнозирования зон рециркуляции после поворота.

**Граничные условия.** Задавались параметры, максимально соответствующие

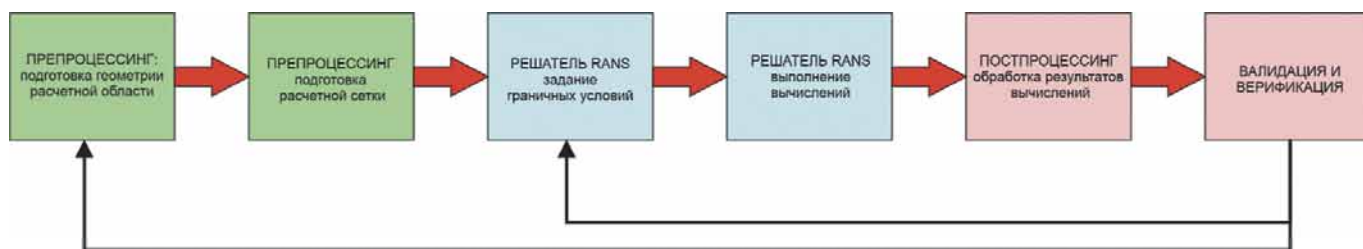


Рис. 3. Методология

щие реальным условиям на ТЭС, такие как скорость потока на входе (соответствовала числу Рейнольдса турбулентного потока  $Re > 10^4$ ), давление на выходе, параметры жидкости (вода при рабочей температуре).

Валидация – краеугольный камень достоверности

Даже самая сложная CFD-модель может не вполне соответствовать реальному физическому процессу. Для определения величины отклонений и их влияния на процесс измерений ультразвуковым времяимпульсным расходомером необходимо подтверждение этого соответствия. Данное подтверждение и доведение модели до необходимого качества (валидация) выполнялись как аналитическими методами инженерной гидравлики, так и экспериментально (рис. 3). Валидация проводилась в два этапа:

- ▶ сравнение результатов моделирования эталонного случая (стабилизированного потока в длинной прямой трубе) с классическими теоретическими зависимостями Прандтля;
- ▶ сопоставление данных моделирования искаженного потока с результатами натурных испытаний, проведенных на аттестованном расходомерном стенде, оснащенный эталонными приборами (расходомерами высшего класса точности).

Такая процедура позволила скорректировать параметры модели (такие как условия на стенке, шаг по времени) и убедиться в ее адекватности для прогнозирования реальных гидродинамических процессов.

#### Результаты исследования: детальная картина искажений после колена 90°

CFD-моделирование предоставило наглядную качественную и количественную картину деформации эпюры скорости потока.

#### Анализ поля скоростей

**Формирование вихрей.** Непосредственно после выхода из колена наблюдается отрыв потока от внутреннего радиуса поворота и формирование зоны рециркуляции. Одновременно с этим под действием центробежных сил поток прижимается к внешнему радиусу. В результате эпюра скорости становится резко асимметричной.

**Закрутка потока.** Помимо осевой составляющей, возникает значитель-

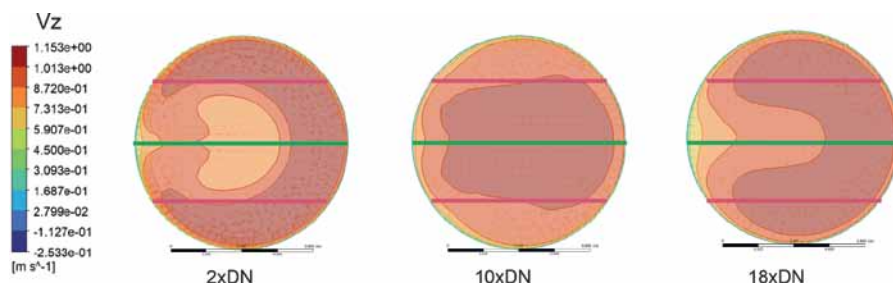


Рис. 4. Эпюры

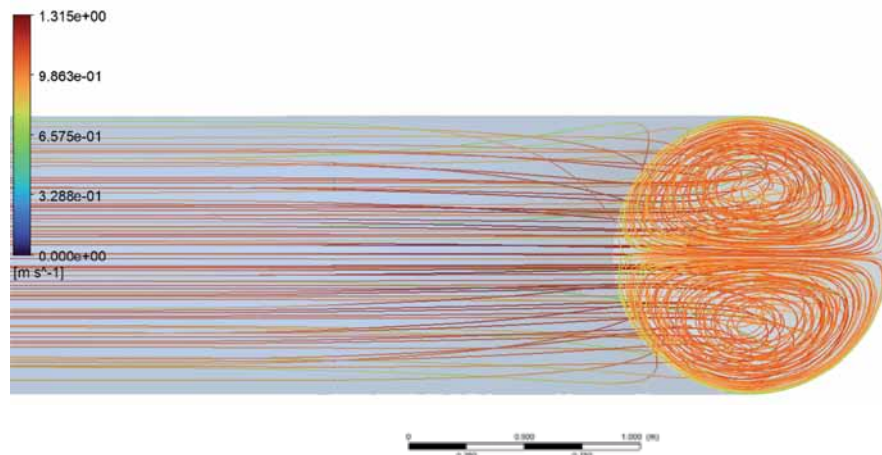
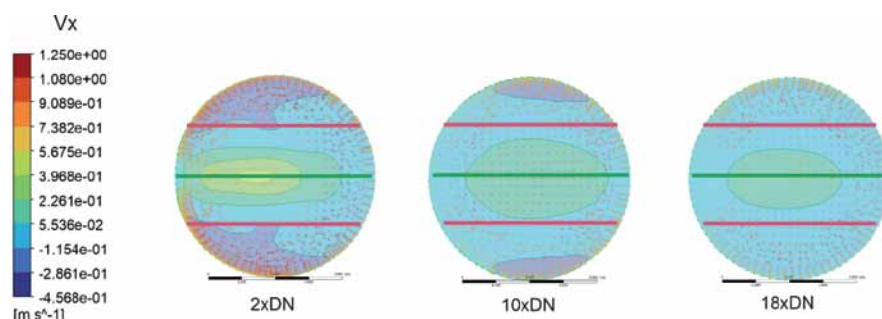


Рис. 5. Линии тока

ная тангенциальная (вихревая) компонента скорости. Этот закрученный поток может сохраняться на очень больших расстояниях.

**Процесс стабилизации.** Восстановление стабильного профиля равномерного течения по длине водовода от источника возмущения – крайне медленный процесс. Моделирование подтвердило, что для полной стабилизации после колена 90° требуется расстояние более 50–70 диаметров трубы (D), что на практике почти нереализуемо. На расстоянии 10 D, где часто вынужденно устанавливаются прибор, профиль все еще сильно деформирован (рис. 4, 5).

Оценка погрешности ультразвукового метода

Было проведено виртуальное тестирование работы однолучевого и двухлучевого расходомеров в смоделиро-

ванном искаженном потоке. Результаты показали:

- ▶ **при однолучевой схеме** погрешность сильно зависит от положения луча. При установке в зоне максимальной скорости (внешний радиус) показания завышены, в зоне отрыва (внутренний радиус) – занижены. Погрешность может достигать  $\pm 5-8\%$ ;
- ▶ **при двухлучевой схеме** погрешность снижается, но не устраняется полностью, так как схема не полностью нивелирует асимметрию профиля, особенно в условиях сильной деформации. Типичная погрешность составляет  $\pm 2-4\%$ .

#### Практические рекомендации:

**инженерные решения для сложных условий**  
На основе анализа результатов моделирования сформулированы конкретные рекомендации.

Оптимизация установки и конфигурации

**Приоритет многолучевых схем.** Для установки в зонах с искаженным профилем настоятельно рекомендуется использовать многолучевые расходомеры (4, 8 или более лучей). Чем больше лучей, тем точнее результаты интегрирования скорости по сечению. Четырехлучевая схема позволяет снизить погрешность до  $\pm 1\%$ , а восьмилучевая – до  $\pm 0,5\%$  даже на расстоянии 5–10 D после колена.

**Выбор плоскости установки.** Моделирование позволяет определить оптимальную плоскость установки преобразователей. В некоторых случаях установка в плоскости колена (горизонтальной) может быть менее предпочтительна, чем в перпендикулярной (вертикальной), из-за разного характера асимметрии.

**Индивидуальные поправочные коэффициенты (коэффициенты калибровки).** Стандартный калибровочный коэффициент, определенный при заводской калибровке и первичной поверке расходомера, в случае деформированного профиля скорости в измерительном створе неприменим. Для каждого конкретного места установки (уникальная геометрия, расстояние до возмущения) на основе CFD-моделирования должен быть рассчитан и внесен в программное обеспечение расходомера индивидуальный поправочный коэффициент (рис. 6). По сути, создается «цифровой паспорт» точки измерения.

Перспективные технологии  
и цифровой двойник

**Адаптивные алгоритмы.** Перспективным направлением является разработка интеллектуальных расходомеров, алгоритмы которых способны адаптироваться к медленным изменениям режимных параметров (расхода, температуры) на основе встроенных моделей, использующих аналитические зависимости и эмпирические данные или обратную связь с другими приборами.

**Гибридное моделирование (CFD + машинное обучение).** Для оперативного пересчета поправочных коэффициентов при изменении режима

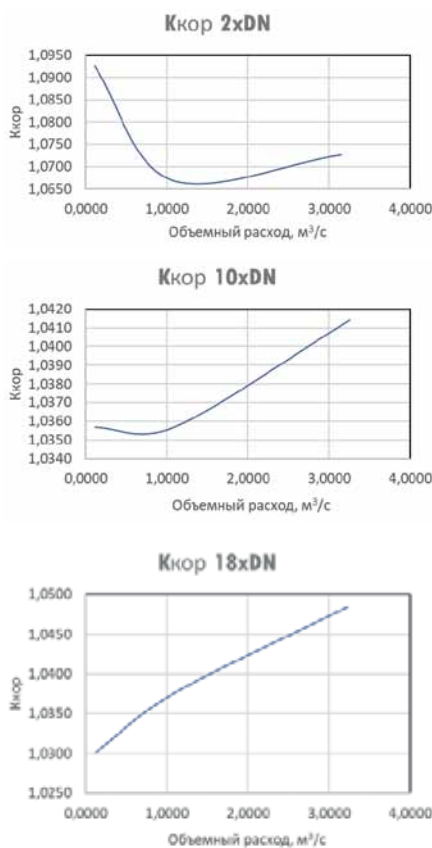


Рис. 6. Графики коэффициентов

можно использовать не трудоемкие CFD-расчеты в реальном времени, а предварительно обученные нейросетевые модели, аппроксимирующие зависимость, полученные в результате серий CFD-симуляций.

**Цифровой двойник трубопроводной системы** – это высшая форма реализации подхода. Создается динамическая виртуальная копия всей трубопроводной системы ТЭС, которая в режиме, близком к реальному времени, получает данные от действующих датчиков (давления, температуры) и постоянно прогнозирует гидродинамическую обстановку во всех ключевых точках, включая поля скоростей. Это позволяет не только осуществлять предиктивную калибровку расходомеров, но и оптимизировать гидравлические режимы всей системы в целом.

#### Заключение

Проведенное исследование доказывает, что современные инструменты компьютерного моделирования открывают новые возможности для

применения высокоточных ультразвуковых расходомеров в ранее считавшихся непригодными условиях.

Основные выводы:

► **индивидуальный подход обязателен.** Недопустимо тиражирование настроек с одного объекта на другой без детального анализа гидравлики конкретного створа измерений;

► **CFD-моделирование – не роскошь, а необходимый инструмент.** Оно позволяет заменить дорогостоящие и длительные натурные эксперименты на виртуальные, с высокой точностью прогнозируя поле скоростей и оптимизируя место и способ установки;

► **многолучевые схемы и калибровка – ключ к точности.** Комбинация многолучевых схем с индивидуальными поправочными коэффициентами, рассчитанными по данным валидированной CFD-модели, является наиболее эффективным методом компенсации «гидродинамических помех».

Рекомендации для внедрения:

► на этапе проектирования – заложить проведение CFD-анализа для всех нестандартных створов измерений в состав проектных работ;

► на этапе монтажа – строго следовать рекомендациям, полученным по результатам моделирования (плоскость, угол, тип прибора);

► в процессе эксплуатации – внедрить систему регулярного мониторинга показаний и, при наличии цифрового двойника, осуществлять его постоянную актуализацию и предиктивную калибровку.

Таким образом, переход от унифицированных решений к персонализированному инженерному подходу, основанному на данных цифрового моделирования, позволяет не только решить проблему измерений в стесненных условиях, но и вывести на новый уровень точность управления технологическими процессами на тепловых электростанциях.

В. В. Бирюков, технический директор,  
ООО НКФ «Волга», г. Москва,  
тел.: +7 (499) 976-4949,  
e-mail: volga@volgald.ru,  
сайт: volgald.ru