

Проект «Сатис»

В. П. БАШУРИН, Е. Е. МЕШКОВ

В конце августа прошлого года перед полуднем к опустевшему после летних отпусков песчаному пляжу на берегу Мокши около пансионата «Дубки» подъехали два автомобиля. Один из них был с прицепом, на котором высилось странное сооружение. Из машин вышли четверо, выгрузили сооружение и установили его в воде на отмели около берега реки. Потом стали бросать что-то в воду и сосредоточенно наблюдать, как это что-то проплывает через сооружение...

Так начался очередной этап работ по проекту «Сатис», участниками которого были сотрудники ООО «Система», СарФТИ НИЯУ МИФИ и ученики лицея № 15. Цель этих работ – исследование возможности создания бесплотинной ГЭС, утилизирующей энергию текущей воды в малых реках.

В наше время во всем мире широко ведутся работы по использованию так называемых возобновляемых источников энергии. В основном, это поток солнечного света, ветер и течение воды как в реках, так и в морских приливах и отливах. Такие источники называются возобновляемыми, поскольку создаются постоянно при взаимодействии солнечного излучения с атмосферой и поверхностью Земли, а Солнце будет светить еще не один миллиард лет. Но заглядывать так далеко вперед, по словам У. Черчилля, недальновидно.

Для практического использования большим недостатком этих источников энергии является небольшой поток мощности, падающий на

единицу поверхности. Так, при скорости ветра 10 м/с или воды при скорости 1 м/с поток мощности составляет примерно 0,5 кВт/м², то есть, чтобы при таких условиях получить мощность в 1 МВт надо собрать энергию потока с площади 2000 м². Такие мощные ветряные станции используются в ряде стран (США, Германия и др.), при этом ветряное колесо имеет лопасти длиной около 100 м. Гораздо удобнее использовать свободные течения воды или воздуха для получения небольших мощностей в диапазоне 1–10 кВт. Такой мощности вполне хватает для отдельного дома или небольшого поселка. Достаточно посмотреть в квитанцию на оплату электроэнергии и убедиться, что средняя семья потребляет в месяц порядка одной-другой сотни киловатт-часов. По статистике сейчас в мире около одного миллиона ветряных генераторов небольшой мощности (больше половины в США и Китае) и их средняя мощность около одного киловатта. Характерный диаметр колеса такого ветряного генератора составляет 3–5 м. При этом ветряные генераторы эффективны в тех местах, где средние скорости ветра выше 5–7 м/с. Как правило, это гористые местности или береговая зона, где утренний и вечерний бриз обеспечивают достаточное время работы генератора. Отметим здесь на будущее, что малая эффективность ветряного генератора в местах, где большая скорость ветра является редкостью, определяется, в первую очередь, тем, что при малой скорости ветряной генератор не то чтобы выдает слишком малую мощность, а просто вообще не работает. В большей части нашей страны скорость ветра недостаточна, чтобы использовать напрямую ветряной генератор; это невыгодно – большую часть времени он будет простаивать. Однако, если мы сможем в зоне расположения ветряного колеса ускорить поток воздуха хотя бы раза в два, мы получим пусть не слишком мощный, но достаточно стабильно работающий источник энергии. Для этого нам надо всего лишь «собрать» ветер с площади, превышающей площадь колеса в те самые два раза, поскольку при скоростях ветра, малых по сравнению со скоростью звука (~330 м/с), плотность воздуха практически не



Модель бесплотинной ГЭС в экспериментах на реке Мокше



Основные элементы модели бесплотинной ГЭС: конфузор (сжимает и ускоряет втекающий поток) и диффузор (создает расширение течения для приема ускоренного потока)

меняется, а поток массы должен сохраняться в трубке тока.

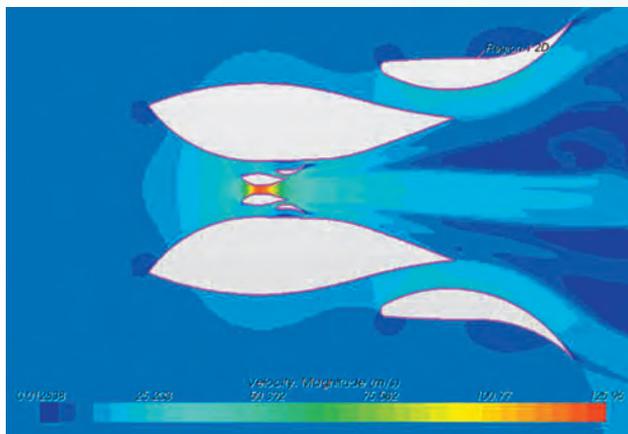
Если мы теперь посмотрим на аналогичную проблему сбора энергии течения реки в небольшой области, где будет располагаться турбина, то для большинства небольших рек мы столкнемся с другой проблемой – малой глубиной потока по сравнению с его шириной. То есть сечение, перпендикулярное движению воды, имеет, скорее, форму полосы, ограниченной в вертикальном направлении. В таком случае диаметр колеса турбины, погруженной в поток, может быть порядка характерной глубины, и для сбора энергии потока с большей части сечения речки нужно использовать не осесимметричную конструкцию.

Имея это в виду, будем рассматривать ускорительную систему, которая не меняет плоский характер течения, полагая, что скорость потока воды в реке или скорость ветра не имеет вертикальной составляющей и не зависит от высоты, по крайней мере, на масштабах порядка размера ускорителя. Тогда вся система должна состоять из элементов с постоянным горизонтальным сечением, ограниченных снизу и сверху горизонтальными непроницаемыми гладкими плоскостями.

В этом случае мы можем рассматривать чисто двумерное течение для оптимизации профилей элементов ускорителя. При успешном решении задачи ускорения потока, возникает соблазн использовать вторую аналогичную, но уменьшенную конструкцию для дальнейшего ускорения уже ускоренного потока, поместив ее внутри первой. И так можно поступать многократно, получая все возрастающую скорость и аккумулируя энергию движения потока в очень малой области. Предварительные расчеты показали принципиальную возможность такой схемы.

Работа по проекту «Сатис» началась в 2013 г. совершенно случайно, после того, как авторы этой статьи встретились, поговорили о том, о сем и договорились встретиться позднее. Вторая встреча случилась уже в СарФТИ и при этом была озвучена идея, родившаяся в ООО «Система» и получившая позднее название проект «Сатис». Она касалась создания малой бесплотинной ГЭС, основанной на предположении о возможности использования эффекта кумуляции энергии в потоке воды.

Идея была чрезвычайно интересной, но для ее реализации, даже с небольшим выходом энергии (1 кВт) требовались деньги, которых у нас не было. Выход был один – проверить работоспособность идеи на малой модели. Для того, чтобы результаты исследования течения на малой модели можно было переносить на натуральный масштаб, необходимо выполнение критерия подобия по числу Рейнольдса. Для течений идеальной жидкости подобие достигается уже при подобии геометрии и граничных условий. При этом меняются лишь пространственные и временные масштабы, а все соотношения между величинами внутри одного и другого течения оказываются тождественными. Когда мы начинаем учитывать реальные характеристики жидкости, влияющие на ее движение, в первую очередь мы сталкиваемся с наличием вязкости. Роль вязкости оказывается особенно существенной для взаимодействия жидкости с ограничивающими движение поверхностями, такими как стенки каналов или сосудов, поверхностью тел, находящихся в жидкости и так далее. Течения вязкой жидкости оказываются подобными, когда подобна и роль вязкости в движении. При подобии геометрии вязкие течения подобны, ес-



Расчет двухкаскадной системы ускорителя потока демонстрирует возможность ускорения потока более чем в 10 раз

ли в этих течениях одинаково так называемое число Рейнольдса, определяющее соотношение динамических и вязких сил. Течения подобны во всей области, если отношение произведения пространственного масштаба и характерной скорости к кинематическому коэффициенту вязкости в этих течениях одинаково. Казалось бы, в этом случае трудно рассчитывать на то, чтобы на малой модели, где и пространственные масштабы и характерная скорость на порядок меньше, чем в реальном течении, а коэффициент вязкости такой же (вода и там, и там), наблюдаемые течения будут подобны. Однако, в этом случае на помощь приходит принцип так называемого ограниченного моделирования. Если в исследуемом течении безразмерный параметр (число Рейнольдса) очень большой или, наоборот, очень маленький, то достаточно, чтобы этот параметр был таким же и в модельном опыте. В нашем случае характерная скорость в исследуемом течении порядка 1 м/с, пространственный размер порядка метра и число Рейнольдса для такого течения воды $Re = 5 \cdot 10^5$. Даже, если в модельном эксперименте мы уменьшим в 10 раз и характерную скорость и характерный масштаб, то число Рейнольдса все равно останется большим $Re_m = 5 \cdot 10^3$. Это означает, что в модельном эксперименте течение воды практически во всем пространстве будет подобным исследуемому, а отличие будет существенным только для течения вблизи границ, в так называемом пограничном слое, характерная толщина которого меньше масштаба течения в $\sim (Re)^{0,5} \sim 70$ раз. Таким образом, принцип подобия исследуемого и модельного течений будет соблюден.

Но следом возникали новые вопросы. В первую очередь, как в лабораторных условиях получить ламинарный поток воды со скоростью порядка 0,1 м/с? В лаборатории имелась гидродинамическая установка, созданная в рамках партнерского (с Аргоннской лабораторией США) проекта, для изучения вихревого течения около моделей тепловыделяющих стержней ядерного реактора. В этой установке можно создавать постоянный поток воды со скоростью до 8 м/с. Но эта установка громоздкая, проведение экспериментов на ней слишком трудоемкое и поэтому дорогостоящее. Нам это было не по карману.

Но отступать мы были не намерены. И в соответствии с французской поговоркой: «Чтобы сделать рагу из зайца, достаточно иметь кошку» была создана простая установка в виде вертикальной цилиндрической стеклянной трубы. Эту трубу когда-то принесли в лабораторию со-

трудники ИЛФИ; для них эта труба была брак, а для нас сущая находка и ее уже не раз использовали школьники в своих экспериментах с пузырями. Вот и теперь она очень нам пригодилась. К трубе мы приладили днище с отверстием по центру; после заполнения трубы водой и некоторой выдержки отверстие открывается, и в трубе начинается течение. Во всем объеме трубы (за исключением придонной области) течение имеет одномерный и ламинарный характер (т. е. во всех точках объема стэнда вода течет строго вдоль оси трубы) и скорость во всем объеме одна и та же. Измерить скорость этого потока просто – это скорость верхней границы воды, которая определяется дифференцированием зависимости высоты уровня воды (H) от времени (t). Соответственно на первом этапе наших исследований проводились эксперименты с осесимметричной моделью ускорителя. Ниже приведена фотография модели.

Вода – одно из самых удивительных творений природы. Не перестаешь удивляться ее свойствам, которые неожиданно проявляются в экспериментах. Первые эксперименты с нашим стэндом мы делали с учеником лицея № 15 Даней Щербаковым. И здесь мы испытали причудливый характер воды. Одновременно это – иллюстрация того, что при решении даже очень простых методических задач можно столкнуться с разного рода неожиданностями. Казалось бы, что может быть проще пробки для нашего стэнда? Перед экспериментом мы вставили в сливное отверстие пробку, выточенную из дерева, и налили воду. Но, когда мы попытались ее вытащить, оказалось, что она застряла намертво, потому что за считанные минуты разбухла в воде. Мы с Даней перепробовали разные варианты пробок, нас обоих окатило водой, когда мы их вынимали. Наконец, нашли подходящую резиновую пробку и проблема была решена.

Найти простое решение задачи совсем не просто потому, что неизвестно заранее, какое из ре-



Первый вариант гидродинамического стэнда

шений, которое приходит вам в голову, окажется верным. В качестве примера можно привести историю с изготовлением первой осесимметричной модели ускорителя потока. Она должна быть с плавными, округлыми формами. Но как изготовить подобную модель? Мы ломали голову и даже подумывали о 3D-принтере. Но от этой затеи пришлось отказаться – слишком дорого. В конце концов, было решено действовать по принципу уже упоминавшейся французской поговорки и сложный, криволинейный контур образующей частей ускорителя – конфузора и диффузора – был приближенно описан отрезками прямых линий, плавные переходы и округлости были заменены на цилиндрические и конические поверхности, детали модели были изготовлены на токарном станке сотрудником СарФТИ А. А. Щепелевым.

Итак, стенд был готов. Модель ускорителя потока была выточена и подвешена в канале стенда на трех нитях. И сразу же возникли вопросы: как измерить скорость потока в ускорителе и как его визуализировать? Подобные исследования в лаборатории раньше не проводились, не было соответствующих методов и их пришлось разрабатывать с самого начала.

Для измерения скорости потока был выбран метод маркеров, а для визуализации – метод окрашенных струек. Варианты этих методов многократно использовались в практике гидродинамических исследований – достаточно посмотреть в интернете известный альбом течений Ван-Дайка. Но в наших случаях использовать известные методы не представлялось возможным, и были разработаны новые варианты известных методов. В качестве маркеров потока были использованы сферические частицы полистирола диаметром ~1 мм. Плотность полистирола близка к плотности воды ($\rho \sim 1,05 \text{ г/см}^3$), и такие частицы полистирола, брошенные в воду, тонут со скоростью ~1 см/с. При проведении экспериментов частицы тонут в покоящейся воде до тех пор, пока они не приблизятся к ускорителю – тогда открывалось сливное отверстие; начиналось течение в канале стенда и ускорение частиц через ускоритель потока регистрировалось на цифровой фотоаппарат Casio Exilim EX-F1 в режиме видеосъемки с частотой 300 кадров в секунду. В таких экспериментах было получено ускорение потока в ускорителе ~1,8 раз. Отработку методики измерения скорости потока проводила И. А. Новикова – аспирант СарФТИ. Ей помогали ученики лицея № 15 Рома Каныгин и Лена Кошелева.

Опыты проводились в конце 2013 г. К этому времени в ООО «Система» были сделаны расчеты, подтвердившие работоспособность нового типа ускорителя потока, конфузор и диффузор которого состояли из пар элементов, вертикально расположенных на дне реки. Явное преимущество такого типа ускорителя в том, что его размеры не ограничены глубиной реки. И для проверки работоспособности такого ускорителя был разработан стенд в виде вертикально расположенной трубы с каналом прямоугольного сечения $6 \times 36 \text{ мм}$ и высотой 1 м.

Характер течения в этом стенде был проверен в экспериментах и в расчетах (результаты опубликованы в Журнале технической физики). Конструкция стенда была разработана главным инженером СарФТИ В. А. Клевцовым в начале 2014 г. и с этого момента он стал одним из наиболее активных участников нашего творческого коллектива. Расчеты течения в стенде выполнили Л. В. Ктиторов и А. Лазарева. Детали модели ускорителя для этого стенда собиралась из набора пластин, вырезанных при помощи лазерного гравера TROTEC с управлением от компьютера – эту работу выполнил сотрудник ИЛФИ В. Хатункин. В отработке стенда приняли активное участие И. Н. Будников, П. Н. Янбаев и Яша Федоренко (студент МГТУ им. Баумана, находясь на летних каникулах). В экспериментах на этой модели было также получено ускорение потока в 2,2 раза.

Разработка метода визуализации течения в наших экспериментах велась с осени 2013 г. Это была очень непростая задача и на ее решение было потрачено немало сил и времени, в первую очередь, Ириной Новиковой. Но в конечном итоге получены фотографии, демонстрирующие особенности течения около модели ускорителя в экспериментах на стенде с прямоугольным каналом.

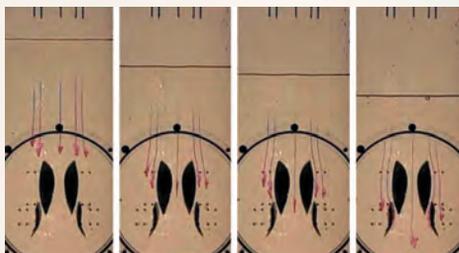
В 2015 г. были повторно проведены эксперименты на реке Мокше. Здесь измерения скорости потока проводились при помощи трубки Пи-



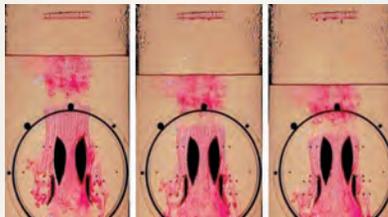
Модель осесимметричного ускорителя потока, подвешенного в канале цилиндрического стенда



Ирина Новикова и Яша Федоренко проводят опыт с моделью плоского ускорителя потока на стенде с прямоугольным сечением канала



Визуализация течения в опыте с моделью плоского ускорителя потока при помощи окрашенных струек



Изменение характера течения при прохождении потока через модель плоского ускорителя

то. При этом было получено ускорение потока такое же, как и в лабораторных экспериментах. В этих экспериментах принимал участие ученик лицея № 15 Тарас Рымарь.

В начале 2014 г. был объявлен конкурс Российского научного фонда на «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами». Мы посчитали, что это удобный случай для получения финансовой поддержки и подали заявку «Расчетно-теоретиче-

ское и экспериментальное исследование возможности утилизации кинетической энергии водного потока без плотины с использованием эффекта кумуляции и разработка на этой основе действующего образца гидроэнергетической установки (проект "Сатис")».

Именно в это время наша работа обрела название «Проект "Сатис"».

Наш проект не получил финансовой поддержки фонда. Но несмотря на это конкурс придал работе импульс. За прошедшее время сделано многое:

- разработана методика расчетного и экспериментального моделирования работы ускорителя потока;
- в экспериментах на моделях разного типа и масштаба с измерениями разными методами получено ускорение потока в 1,8–2 раза;
- расчетно показана возможность ускорения потока более чем на порядок.

Результаты работы были доложены на конференциях «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, июнь 2014; ТМВ, Триест, Италия, август 2014; «Успехи механики сплошных сред», Владивосток, сентябрь 2014; Харитоновские научные чтения, Саров, март 2015. Участник конференции в Евпатории сотрудник филиала МЭИ (г. Волжский) С. Д. Стрекалов, занимающийся разработкой ветродвигателей, выслушав наш доклад, заявил: «Теперь я верю, что у меня есть будущее».

Наш творческий коллектив, включающий сотрудников ООО «Система», СарФТИ, школьников лицея № 15, сформировавшийся за это время, доказал свою состоятельность, и мы надеемся, что у нас тоже есть будущее.



Участники проекта (слева направо): В. А. Клевцов, А. С. Лазарева, Л. В. Ктиторов и В. Ю. Хатункин около последнего варианта гидродинамического стенда

БАШУРИН Виктор Павлович –
начальник отдела ЦПР ИТЦ Технопарк
«Система – Саров», кандидат физ.-мат. наук

МЕШКОВ Евгений Евграфович –
заведующий гидродинамической лабораторией,
доцент кафедры общей физики СарФТИ
кандидат физ.-мат. наук