

УДК 556.546; 532.543

ТУРБУЛЕНТНАЯ ВЯЗКОСТЬ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
В ПРИЛИВНЫХ УСТЬЯХ РЕК¹© 2024 г. А. М. Алабян^{a, b, *}, Е. Д. Панченко^{a, b}^a Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Москва, 119991 Россия^b Институт водных проблем РАН
Москва, 119333 Россия

*e-mail: andrei_alabyan@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2023 г.

После доработки 17.02.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

В ходе полевых гидрометрических работ в устьях рек Беломорского бассейна получены данные, касающиеся особенностей динамики реверсивных приливных течений. Среди изученных в 2015–2022 гг. устьевых участков приливных рек наиболее интересные результаты получены в мезоприливном устье р. Кянды, впадающей в Онежский залив Белого моря, и в макроприливном устье р. Сёмжи, впадающей в эстуарий Мезени. Суть используемого метода полевых исследований состояла в синхронном измерении расходов воды акустическими доплеровскими профилографами и уровня воды автономными барометрическими регистраторами в двух поперечных сечениях, находящихся на разном удалении от устьевого створа реки, в течение полного полусуточного приливного цикла. Результаты данных измерений использовались для расчета членов уравнения движения системы Сен-Венана и коэффициентов гидравлического сопротивления. Установлено, что на приливных участках рек гидравлическое сопротивление существенно изменяется в течение приливного цикла. В периоды квазиустановившегося течения воды в обоих направлениях в прилив и отлив значения коэффициента гидравлического сопротивления Дарси–Вейсбаха составляют 0.04–0.07, что свойственно рекам со сходными морфологическими характеристиками русла. Однако в нескольких случаях, в периоды, близкие к смене направления течений, коэффициент гидравлического сопротивления принимал отрицательные значения. Одна из возможных трактовок этого феномена – отрицательная турбулентная вязкость, проявляющаяся в определенные фазы приливного цикла, когда энергия вихревых образований может передаваться поступательному движению водной массы.

Ключевые слова: реверсивные течения, Белое море, приливный цикл, гидравлическое сопротивление, диссипация энергии, турбулентная вязкость, устьевой участок реки.

DOI: 10.31857/S0321059624010026 EDN: EEMVNH

ВВЕДЕНИЕ

Со времен Исаака Ньютона сила сопротивления, возникающая между слоями движущейся воды (“жидкое трение”), выражается через касательное напряжение τ , принимаемое пропорциональным градиенту скорости u в направлении, перпендикулярном направлению движения y :

$$\tau = \rho \nu \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

ρ – плотность воды, ν – коэффициент кинематической вязкости, который при ламинарном дви-

жении воды постоянен (зависит только от температуры и имеет порядок $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

В конце XIX в. Ж. Буссинеск [28], анализируя уравнения О. Рейнольдса [33] для турбулентных потоков, предложил выражать ковариационные моменты пульсаций компонент скорости через турбулентный коэффициент вязкости ν_t аналогично коэффициенту ламинарной (молекулярной) вязкости в формуле (1):

$$\tau = -\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_m \frac{du}{dy}. \quad (2)$$

При этом значение ν_t на несколько порядков превышает значение ламинарной вязкости и является характеристикой скорее режима течения, чем самой жидкости [25].

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-01184, <https://rscf.ru/project/22-29-01184/>).

В практической гидравлике жидкое трение характеризуется гидравлическим сопротивлением, которое принято выражать через эмпирические коэффициенты, связывающие среднюю скорость течения с уклоном трения $I_{тр}$ (называемого также “гидравлическим уклоном”), значения которого при равномерном движении соответствуют геометрическому уклону водной поверхности:

$$I_{mp} = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{n^2 u^2}{R^{4/3}} = \frac{\lambda u^2}{8gR}, \quad (3)$$

C – коэффициент Шези; n – коэффициент шероховатости Маннинга; λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления Дарси–Вейсбаха; g – ускорение свободного падения; R – гидравлический радиус потока, близкий по величине к его средней глубине h (при отсутствии ледостава).

Связь турбулентной вязкости, выраженной через среднее по вертикали значение коэффициента турбулентного обмена $A = \rho \nu_t$, с гидравлическим сопротивлением предложена В.М. Маккавеевым [12] исходя из анализа распределения скорости по вертикали для естественных русловых потоков:

$$A = \frac{\rho g h u}{2mC}, \quad (4)$$

m – параметр, равный 24 по Базену или 22.3 по Буссинеску [9].

Значения коэффициента кинематической вязкости ν в формуле (1) всегда положительны, что имеет строгое термодинамическое обоснование [19, 22]. Однако, по мнению А.С. Монины [18], механическое перенесение такой трактовки на турбулентные течения неправомерно и коэффициент вязкости ν_t может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от особенностей механизма перехода кинетической энергии в тепловую (диссипация).

При турбулентном течении диссипация энергии обычно происходит путем ее передачи от осредненного движения к наиболее крупным турбулентным вихрям, от них к более мелким и т. д., пока размеры вихрей не станут соизмеримыми с размерами молекул и механическая

энергия не начнет переходить непосредственно в теплоту [10, 13, 19, 20, 22, 25]. При таком порядке передачи энергии (называемом “каскадом Колмогорова”) турбулентная вязкость положительна, однако если этот порядок нарушается, то коэффициент турбулентной вязкости может принимать и отрицательные значения [23].

ИСТОРИЯ ВОПРОСА ОБ “ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ВЯЗКОСТИ”

Предположение о возможности обратного перехода энергии поступательного движения водной массы в энергию вихревых структур высказано в первой половине XX в. Ф. Форхгеймером [26]: “Осредненное течение может превращаться не только в тепло и в вихри; пожалуй, и наоборот, благодаря уменьшению вихрей может появиться ускорение осредненного движения; однако относительно этого опытных данных нет”. В последующие десятилетия XX в. такое допущение поддерживалось в ряде отечественных и зарубежных теоретических аэро- и гидродинамических исследований [22, 29, 30], однако и противоположная точка зрения допускалась ведущими учеными того времени [3, 9].

Анализ проявлений отрицательной вязкости в современных газо- и гидродинамических экспериментах, выполненный профессором Саратовского государственного технического университета (СГТУ) Л.И. Высоцким [4], позволил ему сделать вывод, что “появившиеся в последнее время результаты высокоточных измерений распределения осредненных скоростей в трубах и погранслое на плоской пластине напрямую свидетельствуют в пользу существования слоя с отрицательной вязкостью, что является прямым подтверждением этого факта”. Данное направление исследований отрицательной вязкости продолжает развиваться в СГТУ [5, 8].

Применительно к крупномасштабным процессам феномен отрицательной турбулентной вязкости наиболее детально рассмотрен в книге В. Старра (Массачусетский технологический институт) [23] с предисловием А.С. Монины [18]. Будучи метеорологом, В. Старр детально исследовал эффекты отрицательной турбулентной вязкости главным образом в атмосферных

процессах, причем в атмосфере не только Земли, но и Солнца, Юпитера и Сатурна, а также применительно к спиральным галактикам и околосолнечной туманности. В практических приложениях динамической метеорологии передача вихревой энергии поступательному движению и отрицательная вязкость также допускаются [14, 27].

Из гидродинамических сюжетов В. Старром рассмотрены вопросы, связанные с океанической циркуляцией и меандрами Гольфстрима. Прогнозируя места возможного проявления отрицательной вязкости, он указывает: "...эффекты отрицательной вязкости не могут доминировать в стационарном режиме, так как вся кинетическая энергия нерегулярных движений была бы скоро исчерпана". При этом для поддержания квазистационарного режима в системе с преобладающим эффектом отрицательной турбулентной вязкости необходимы два условия: "а) Нерегулярные движения, которые переносят импульс против градиентов среднего течения, должны иметь источник турбулентной кинетической энергии...; б) Среднее течение должно подвергаться некоторому виду торможения, чтобы не возрастать беспредельно..." [18].

Этим условиям практически идеально соответствуют приливные устья, однако о них В. Старр в [23] упоминает лишь косвенно в связи с анализом приливных течений: "Перенос импульса происходит по направлению градиента средней скорости, что соответствует положительной турбулентной вязкости. Однако при некоторых условиях приливные течения... могут изменить направление градиента среднего течения на обратное, тогда как перенос импульса происходит по-прежнему вниз, создавая таким образом эффект отрицательной вязкости".

Упоминание о возможном проявлении отрицательной турбулентной вязкости в приливном устье р. Онеги содержится в статье [6]. На основе анализа трансформации эпюры вертикального распределения скорости в приливный цикл при ледоставе авторами [6] было установлено, что дважды за приливный цикл коэффициент турбулентного обмена (произведение коэффициента турбулентной вязкости и плотности воды) при-

нимает отрицательные значения. Анализируя этот факт, авторы делают весьма осторожный вывод: "Само по себе явление отрицательной вязкости — довольно распространенное в турбулентных процессах с наложенными внешними волновыми возмущениями [ссылка на 23], однако определенно утверждать, что и в нашем случае это закономерно, мы не можем, так как проверить ее статистическую обеспеченность нет возможности из-за отсутствия статистического ансамбля. Поэтому пока следует иметь в виду лишь возможность появления отрицательных значений "коэффициента" турбулентного обмена в приливном течении подо льдом".

В 2015–2022 гг. в приливных устьях рек Беломорского бассейна (Северная Двина, Онега, Мезень, а также малые реки Кянда, Тамица, Сёмжа, Лая) во время экспедиций кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ выполнялись детальные гидрометрические измерения с использованием современного гидрологического и геодезического оборудования [2, 24, 32]. Изначально их целью был сбор данных для гидродинамического моделирования [11, 21], а также для решения частных гидроэкологических проблем [15, 16]. Однако при детальном анализе соотношения членов уравнений Сен-Венана при реверсивном движении водных масс на устьевых участках малых рек Кянды и Тамицы было обнаружено парадоксальное, на первый взгляд, явление — сильная изменчивость гидравлического сопротивления в приливный цикл вплоть до его отрицательных значений [1, 2].

В результате накопления фактического материала, расширения географии исследований, а также совершенствования методики работ [32] установлено, что данный результат не является следствием погрешности измерений. Одной из гипотез, в рамках которой может быть рассмотрен феномен изменчивости гидравлического сопротивления и его отрицательных значений, может быть допущение проявления отрицательной турбулентной вязкости, возникающей в реверсивном водном потоке в определенные фазы приливного цикла.

Ввиду того, что гидравлическое сопротивление отражает потерю водным потоком энергии,

его вариации в приливный цикл могут объясняться соотношением частей водного потока с “прямой” и “обратной” передачей энергии по каскаду Колмогорова. В случае, когда доминирует “прямой” переход энергии поступательного движения в энергию вихрей и далее в теплоту, сопротивление положительно. Если же “возврат” превосходит диссипацию, то сопротивление становится отрицательным: вместо потери энергии осредненным движением происходит его подпитка энергией пульсаций.

При определенном сочетании приливного и “стокового” расхода воды такая ситуация наблюдалась (и зафиксирована инструментально) на Кянде, Тамице и Сёмже на протяжении 0.5–1.5 ч после момента наступления полной воды, когда при практически горизонтальной водной поверхности скорость отливного течения увеличивалась [1, 2, 32].

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках одномерной схематизации реверсивное течение на устьевом участке реки описывается уравнениями Сен-Венана, при этом уравнение движения может быть записано в следующем виде:

$$-\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{h}{2\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u|u|}{8gh}, \quad (5)$$

здесь x — продольная координата вдоль динамической оси потока, направленная вниз по течению; t — время; z — отметка свободной поверхности; α_0 — коэффициент Буссинеска (корректив кинетической энергии); α — коэффициент Кориолиса (корректив количества движения).

Левая часть уравнения (5) представляет собой “геометрический” уклон водной поверхности $I = -\frac{\partial z}{\partial x}$. Первый член правой части $\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t}$ характеризует локальное ускорение, второй член $\frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x}$ — конвективное ускорение (их вместе называют “инерционными членами”). “Плотностной” член $\frac{h}{2\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ принимается во внимание, когда соленые морские воды поступают на устьевой участок реки и создают продольный градиент

плотности воды; если же этого не происходит, то его значением пренебрегают.

Четвертый “фрикционный” член правой части уравнения (5) представляет собой уклон трения $I_{тр}$, обычно выражаемый одной из формул вида (3), где квадрат средней скорости заменяется на произведение скорости и ее модуля, чтобы обеспечить действие силы трения в сторону, противоположную направлению течения [17, 31]:

$$I_{тр} = \frac{\lambda u|u|}{8gR}. \quad (6)$$

В основе такого подхода к параметризации гидравлического сопротивления — допущение, что при неустановившемся движении воды оно будет таким же, как в случае равномерного течения, с той же скоростью при тех же глубине и шероховатости русла.

Использование в уравнении (5) и формуле (6) коэффициента гидравлического сопротивления λ (а не гораздо более популярных в речной гидравлике коэффициентов Шези и Маннинга) обусловлено тем обстоятельством, что при несопадении знаков при скорости и уклоне трения в формулах вида (3) только он может принимать отрицательные значения.

Уклон трения вычисляется из уравнения (5) как разность геометрического уклона (левая часть) и остальных членов правой части уравнения. Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывается исходя из полученных величин уклона трения по формуле (6).

Для ориентировочной оценки коэффициента турбулентной вязкости зависимость (4) приведена для реверсивных потоков к виду, позволяющему получить отрицательные значения v_t при отрицательных значениях λ :

$$v_m = 0.025h|u| \frac{\lambda}{\sqrt{|\lambda|}}. \quad (7)$$

При этом замена коэффициента C на λ выполнялась исходя из соотношения (3).

Значения всех членов уравнения (5), за исключением фрикционного, могут быть рассчитаны непосредственно по данным высокоточных

полевых данных. Для этого в полный приливный цикл необходимо выполнить синхронные измерения уровня и расхода воды (средней скорости течения), а также солёности и температуры воды в двух поперечных сечениях, находящихся на различном удалении от устьевых створа реки [1, 2, 32]. Использование акустических доплеровских профилографов течения (Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)) в комплексе с автономными барометрическими регистраторами уровня воды (“логгерами”) позволяет обеспечить необходимую для анализа точность расчетов применительно по крайней мере к малым рекам. В устье малой реки время прохождения поперечника судном с ADCP занимает 3–5 мин., что позволяет принимать результат измерения как мгновенную величину расхода воды и среднюю скорость течения. (Возможность такого допущения для более крупных рек пока еще под вопросом, так как при ширине русла в несколько сотен метров и более время измерения расхода воды может оказаться соизмеримо с продолжительностью отдельных фаз полусуточного приливно-

го цикла, включая процессы разворота течений на приливе и отливе.)

Среди изученных в 2015–2022 гг. устьевых участков приливных рек Беломорского бассейна наиболее интересные результаты получены в мезоприливном устье р. Кянды, впадающей в Онежский залив Белого моря [1, 2] и в макроприливном устье р. Сёмжи, впадающей в эстуарий Мезени [32] (рис. 1).

Эти малые реки протекают в схожих физико-географических условиях, определяющих особенности водного режима. Они имеют преимущественно снеговое питание, по водному режиму относятся к восточноевропейскому типу с высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. Максимальные расходы воды на Кянде обычно наблюдаются в начале мая, на Сёмже – в середине или в конце мая. Летне-осенняя межень начинается в июне и заканчивается в ноябре, наименьший сток наблюдается обычно в августе, когда и выполнялись измерения. В ре-

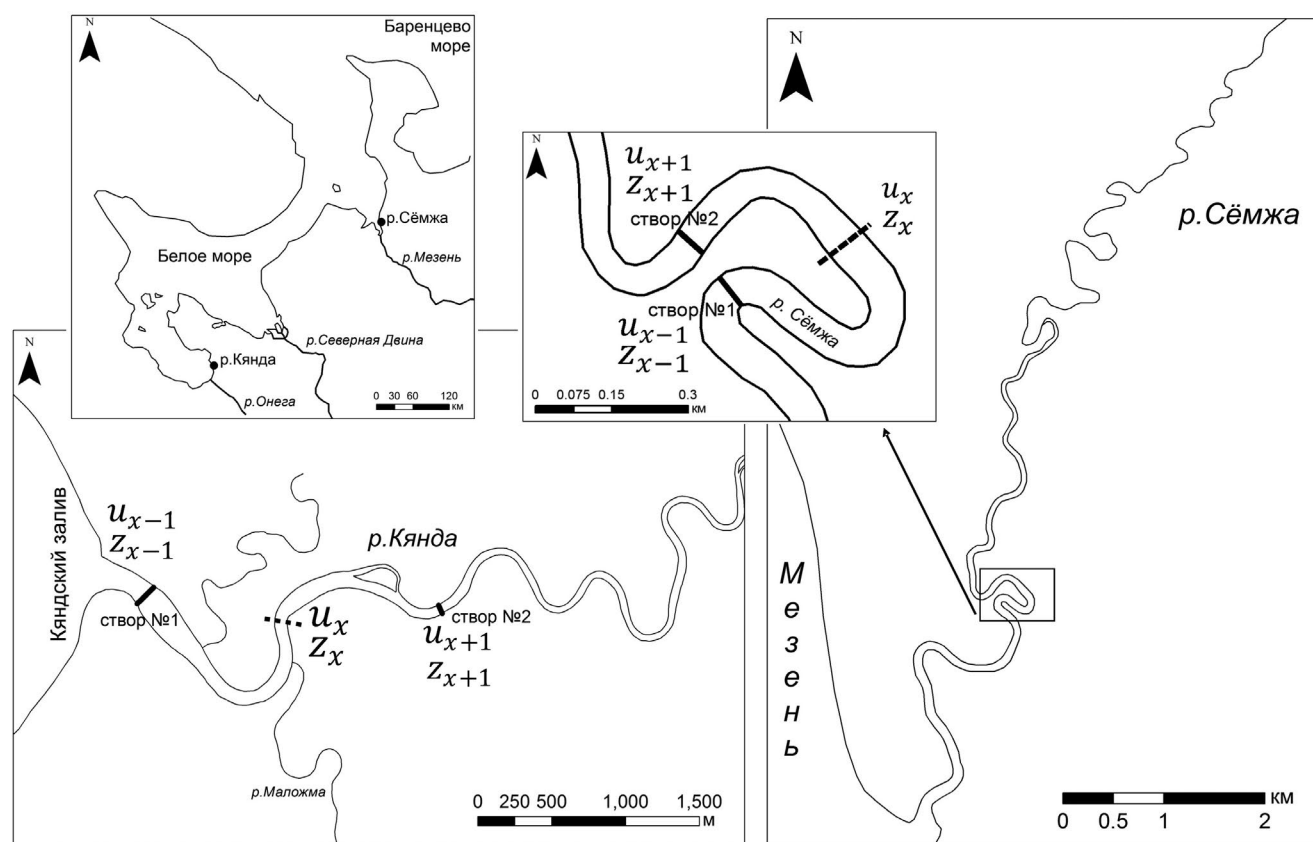


Рис. 1. Картограмма объектов исследования — рек Кянды и Сёмжи.

Таблица 1. Основные гидродинамические характеристики устьевых участков Сёмжи и Кянды по данным измерений в летнюю межень в 2015–2018 гг.

Характеристика	Единицы измерения	Сёмжа	Кянда
Наибольшая измеренная величина прилива в устьевом створе	м	7.0	2.2
Максимальный измеренный расход воды на приливе (в сторону реки) в устьевом створе	м³/с	–280	–138
Максимальный измеренный расход на отливе (в сторону моря) в устьевом створе	м³/с	245	85
Измеренный речной расход воды	м³/с	5	5
Средний уклон реки	‰	0.61	1.90
Средний уклон реки в нижнем течении	‰	0.26	0.20
Измеренная дальность проникновения прилива (приливных колебаний уровня воды)	км	21–22	10
Измеренная дальность проникновения обратных течений	км	>12	8
Измеренная дальность проникновения соленых вод	км	12.0	6.5
Максимальная соленость в устьевом створе	епс	18	20
Диапазон изменения плотности в створах измерений	кг/м³	1000–1010	1000–1016

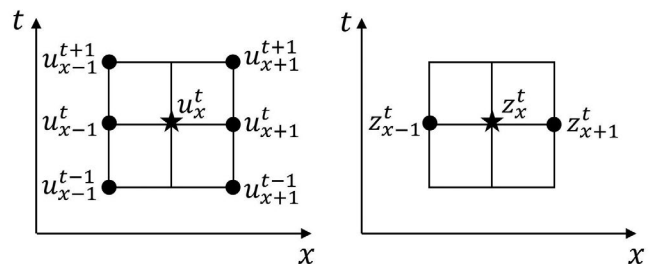
зультате в межень величины приливных и отливных расходов воды на 1–2 порядка превышают их стоковые значения (табл. 1).

Подробные измерения уровней и расходов воды для расчета членов уравнения движения были выполнены на устьевых участках Кянды и Сёмжи в условиях летней межени в 2016 и 2018 гг. соответственно. Величина прилива в период наблюдений в устьевом створе Кянды достигала 2.2 м, на Сёмже – 7.0 м. На Кянде в 2016 г. нижний створ соответствовал устьевому створу, верхний располагался в 2.8 км выше. На Сёмже в 2018 г. расстояние между створами составляло 0.9 км (3.6 и 4.5 км выше устьевого створа). Выбор участка исследования на омеговидной излучине русла Сёмжи сделан с целью обеспечения максимально точной увязки “нулей логгеров” в верхнем и нижнем створах (можно выполнить нивелировку уровня с одной стоянки при ширине перешейка <100 м).

Соленость и, соответственно, плотность воды на Сёмже в верхнем и нижнем створе изменялась практически одновременно, за счет чего плотностной уклон в течение всего периода не оказывал влияния на уклон трения. На Кянде в течение

приливного цикла между створами наблюдалось два пика градиента плотности (табл. 1), поэтому плотностной уклон учитывался при расчете уклона трения и коэффициента гидравлического сопротивления.

Расчет членов уравнения движения (3) проводился с применением конечно-разностной схемы (5–8) аналогично схеме, применяемой для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных (рис. 2). При такой схематизации полученные значения гидродинамических характеристик можно считать относящимися к створу, расположенному посередине между створами измерений. Соответственно, принималось допущение об адекватности линейной интерполяции гидравлических параметров потока и

**Рис. 2.** Схема расчета членов уравнения движения.

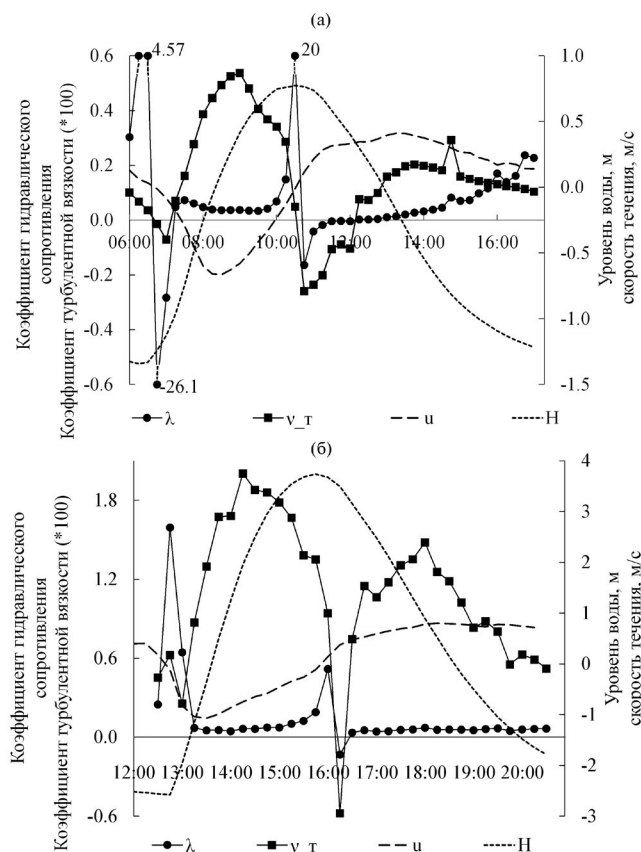


Рис. 3. Изменение коэффициента гидравлического сопротивления λ , коэффициента турбулентной вязкости ν_T , средней скорости течения u и уровня воды в ходе приливного цикла: а – на р. Кянда 04.08.2016; б – на р. Сёмжа 14.08.2018.

морфометрических характеристик русла между створами (что подтверждено данными промерных работ). Расчетный шаг по длине Δx составлял половину расстояния между створами измерений. Средний шаг по времени Δt подбирался в соответствии со скоростью перемещения фронта волны прилива $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ и исходя из результатов полевых наблюдений был принят равным 15 мин.

Изменение скорости течения во времени для расчета локального ускорения рассчитывалось по формуле:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \approx \frac{u_{x+1}^{t+1} + u_{x-1}^{t+1} - u_{x+1}^{t-1} - u_{x-1}^{t-1}}{4\Delta t}, \quad (8)$$

при этом $(u_{x+1}^{t+1} - u_{x-1}^{t-1}) / 2\Delta t$ соответствует изменению скорости течения в верхнем створе за 30 мин, $(u_{x-1}^{t+1} - u_{x-1}^{t-1}) / 2\Delta t$ – изменению в нижнем створе.

Расчет изменения скорости течения вдоль русла для определения конвективного ускорения проводился аналогично:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{x-1}^{t-1} + u_{x-1}^{t+1} - u_{x+1}^{t-1} - u_{x+1}^{t+1}}{4\Delta x}, \quad (9)$$

$(u_{x-1}^{t-1} - u_{x+1}^{t-1}) / 2\Delta x$ соответствует изменению скорости течения между створами на нижнем временном слое $(t-1)$; $(u_{x-1}^{t+1} - u_{x+1}^{t+1}) / 2\Delta x$ – на верхнем временном слое $(t+1)$.

Средняя скорость течения определялась по двум измеренным скоростям течения:

$$u = \frac{u_{x+1}^t + u_{x-1}^t}{2}. \quad (10)$$

Для расчета уклона водной поверхности в момент времени t использовались отметки уровней воды в нижнем и верхнем створе:

$$\frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{z_{x-1}^t - z_{x+1}^t}{2\Delta x}. \quad (11)$$

Аналогичная разность применялась при расчете плотностного члена. Коэффициенты Буссинеска и Кориолиса рассчитывались исходя из анализа скоростного поля потока на поперечнике, полученного с помощью ADCP при измерении расходов воды.

Таким образом, непосредственно по данным полевых измерений были рассчитаны члены уравнения движения (5), соответствующие локальному и конвективному ускорению, а также плотностной член и уклон водной поверхности. Уклон трения $I_{тр}$ определялся как их разность в соответствии с уравнением (5). Исходя из полученных значений $I_{тр}$ по формуле (6) рассчитаны значения коэффициента гидравлического сопротивления Дарси–Вейсбаха, а по формуле (7) – соответствующие им значения коэффициентов турбулентной вязкости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Максимальные абсолютные значения геометрического уклона (как прямого, так и обратного), а также уклона трения на обеих реках отмечались в периоды квазиустановившегося течения на приливе и отливе [2, 32]. На Сёмже они были порядка 10^{-4} , на Кянде – 10^{-5} . Значе-

ния инерционных членов, напротив, достигали своих максимумов (порядка 10^{-6} – 10^{-5}) при нарастании и замедлении течений. Плотностной член для Сёмжи большую часть приливного цикла имел порядок 10^{-7} – 10^{-8} и только в начале приливного подъема уровня увеличился до 10^{-6} , однако оставался в несколько раз меньше инерционного члена. На Кянде изменение порядка плотностного уклона было от 10^{-8} до 10^{-6} , что соизмеримо с диапазоном изменения конвективного ускорения.

Установлено, что гидравлическое сопротивление существенно варьирует в приливный цикл (рис. 3). Коэффициент гидравлического сопротивления λ изменялся на Кянде в диапазоне от -26.0 до 20.0 , на Сёмже от -0.13 до 0.52 . В периоды квазиустановившегося течения воды как в прилив, так и в отлив значения коэффициента гидравлического трения — в диапазоне 0.04 – 0.07 . Соответствующий таким значениям λ диапазон значений коэффициентов шероховатости Маннинга n составляет 0.015 – 0.030 при характерной для этих рек глубине потока. Это вполне соответствует “обычным” рекам со сходными морфологическими характеристиками русла.

Наиболее “нетипичные” значения гидравлического сопротивления были зафиксированы в моменты смены направления течения. При развороте течений наблюдалось сначала резкое увеличение коэффициента гидравлического сопротивления, а потом в течение 0.5 – 1.5 ч — его резкое уменьшение. Отрицательные значения после смены направления течений зафиксированы и для Кянды, и для Сёмжи, а первичная оценка возможных ошибок расчета, связанных с инструментальной погрешностью измерений, не отбрасывала данные значения [32].

Турбулентная вязкость ν_t изменялась в приливный цикл на Сёмже от -0.006 до $+0.020$ $\text{м}^2/\text{с}$, на Кянде от -0.0026 до $+0.0054$ $\text{м}^2/\text{с}$. Полученные крайние в вариациях значения коэффициентов турбулентной вязкости на 3–4 порядка превышают молекулярную вязкость воды, что вполне согласуется с традиционными оценками [25].

При изучении взаимосвязи отрицательного гидравлического сопротивления и отрицатель-

ной турбулентной вязкости необходимо рассмотреть соотношение частей водного потока с передачей энергии в прямом и обратном направлении каскада Колмогорова. Если энергия пульсаций переходит в тепло и возвращается к осредненному течению в равных долях — то общее гидравлическое сопротивление транзитного потока равно нулю; если “возврат” превосходит диссипацию — то сопротивление становится отрицательным: вместо потери энергии осредненным движением происходит его подпитка энергией пульсаций и скорость осредненного течения увеличивается.

Отрицательные значения гидравлического сопротивления, наблюдающиеся после разворота течений на Кянде и Сёмже, свидетельствуют о преобладании в потоке обратного перехода энергии вихревых образований в энергию поступательного движения водной массы. Высокоточные измерения течения показывают, что в обоих створах при отли-

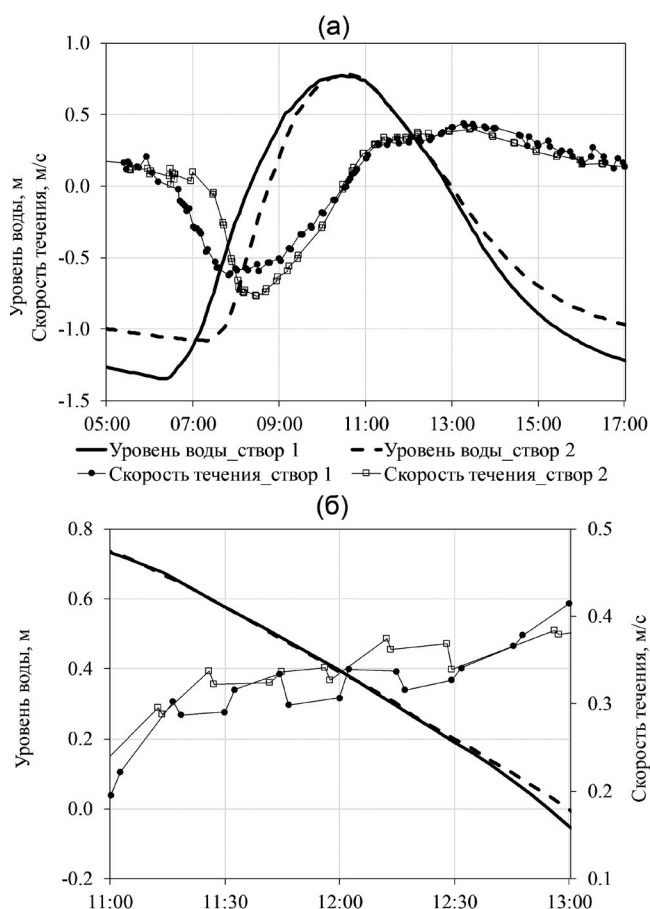


Рис. 4. Изменение средней скорости течения и уровней воды на р. Кянде 04.08.2016: а — в ходе приливного цикла; б — при отливном течении с 11 до 13 ч.



Рис. 5. Поверхность воды на приливном участке р. Кянды в момент разворота течения.

ве после разворота течения его скорость постепенно нарастает со временем при отсутствии уклона водной поверхности в сторону моря (рис. 4).

При горизонтальной свободной поверхности устьевого участка реки сила тяжести не может быть движущей силой, перемещающей массы воды в сторону моря, как это происходит в “нормальных” реках при наличии уклона водной поверхности. Во время измерений ветра не было, сила гидростатического давления, обусловленная разностью плотности речной и морской воды, была пренебрежимо мала и к тому же действовала в направлении, противоположном ускоряющемуся отливному течению. Силой, способной вызвать ускорение движения водной массы, могла бы быть некоторая “особая сила”, возникающая в результате высвобождения вихревой энергии при ее обратном переходе к поступательному движению и находящая свое формальное отражение в отрицательных значениях уклона трения и гидравлического сопротивления.

Анализируя природу гидравлического сопротивления в связи с вязкостью жидкости, М.А. Великанов [3] писал, что “именно процесс перехода механической энергии в теплоту, иначе говоря, диссипация энергии, и является источником того гидродинамического сопротивления, учет которого необходим при решении очень многих практических задач”. И далее, рассуждая о вихре-

вой структуре и перемещении некоторых малых объемов жидкости в турбулентном потоке, он указывает, что “мы... можем заменить эти беспорядочные движения их статистическим эффектом, а именно, особыми силами, аналогичными силам вязкости”. Таким образом, турбулентная вязкость им рассматривается как источник некоторой “особой силы” — хоть и аналогичной, но отнюдь не тождественной по своей природе силе молекулярного трения, определяющей положительные значения коэффициентов гидравлического сопротивления в рамках общепринятой параметризации уклона трения.

Предлагаемая схема возможного перераспределения энергии в реверсивном потоке позволяет интерпретировать и тот факт, что коэффициенты турбулентной вязкости и гидравлического сопротивления принимают наибольшие значения непосредственно перед разворотом течения. Это отражает интенсивный переход энергии осредненного движения к вихревому, а после разворота течения происходят “сработка” аккумулированной в вихрях энергии и ее обратный трансфер к осредненному движению водной массы.

Результаты гидрометрических измерений на приливных участках рек подкреплялись и результатами визуальных наблюдений за характером течений: во время выполнения измерений было отчетливо видно, что при развороте основного течения водная масса не стоит на месте, а представляет собой систему разномасштабных вихрей, хаотично перемещающихся по акватории устьевой области. В частности, на рис. 5 отчетливо видны следы пены, оконтуривающей крупные вихри, сходные по очертаниям с меандрами. После начала отлива вихри упорядочивались, формируя ускоряющееся транзитное течение в сторону моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты анализа данных полевых измерений в устьях приливных рек Беломорского бассейна демонстрируют сильную изменчивость гидравлического сопротивления в ходе приливного цикла: перед разворотом течения оно увеличивается, а затем резко уменьшается вплоть до отрицательных значений. Одним

из возможных объяснений этого феномена может быть обратный трансфер энергии вихревого движения поступательному, что проявляется в отрицательной турбулентной вязкости аналогично тому, как это происходит в океане [7].

При этом следует понимать, что отрицательная вязкость — это (к сожалению) не столь полезный феномен, как сверхпроводимость или сверхтекучесть, а всего лишь причуда параметризации жидкого трения, принятого еще со времен Ньютона. Правомерность и целесообразность введения Буссинеском понятия турбулентной вязкости для выражения турбулентных напряжений Рейнольдса — все еще дискуссионный вопрос [5], хотя уже более столетия такой подход находит применение при решении практических задач.

В то же время правильное задание параметров турбулентной вязкости и зависящего от нее гидравлического сопротивления — условие корректного моделирования приливных течений. С практической точки зрения это важно при энергетическом, рекреационном и водотранспортном использовании устьевых областей рек России. Принимая во внимание, что практически все реки Российской Арктики из-за малых уклонов в их устьях должны рассматриваться при моделировании как приливные, учет обнаруженных эффектов необходим. Кроме того, приливные устья представляют собой уникальную природную лабораторию для исследования взаимодействия вихревых и поступательных движений водных масс, происходящих не только в приливных реках, но и в Мировом океане.

Следует заметить, что преобладание обратного перехода энергии от вихревого движения к поступательному в приливных устьях проявляется лишь при определенном “удачном” сочетании параметров речного стока и морского прилива. Критериальные оценки диапазона обнаруженных гидродинамических эффектов могут быть выполнены по мере накопления высокоточного материала натурных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабян А.М., Панченко Е.Д. Гидравлическое сопротивление в приливных устьях и феномен “отрицательного трения” в речной гидравлике // Инженерные изыскания. 2017. № 3. С. 24–32.
2. Алабян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2018. № 4. С. 39–48.
3. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. 1. Структура потока, М.: Гос. изд-во тех.-теорет. лит., 1954. 324 с.
4. Высоцкий Л.И. Существуют ли зоны с отрицательной вихревой вязкостью в продольно-однородных турбулентных потоках? // Инженерно-строител. журн. 2013. № 2. С. 48–53.
5. Высоцкий Л.И., Высоцкий И.С. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки. СПб.: Лань, 2015. 672 с.
6. Дебольский В.К., Зырянов В.Н., Мордасов М.А. О турбулентном обмене в приливном устье при наличии ледяного покрова // Динамика и термика рек и водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 279–290.
7. Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Н.В. и др. Вытягивание мезомасштабных вихрей океана в субмезомасштабные вихревые нити как способ передачи энергии по каскаду размеров. Проявление свойств отрицательной турбулентной вязкости при вытягивании вихрей // Моря России: вызовы отечественной науки. Севастополь, 2022. С. 47–48.
8. Калякин А.М., Чеснокова Е.В., Тесля М.В. Некоторые свойства границы в потоках с отрицательной турбулентной вязкостью // Социально-экономические проблемы жилищного строительства и пути их решения в период выхода из кризиса. Саратов: СГТУ, 2010. С. 208–211.
9. Караушев А.В. Речная гидравлика. Л.: Гидрометеопиздат, 1969. 416 с.
10. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // ДАН СССР. № 4. 1941. С. 299–303.
11. Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. № 1. С. 18–25.
12. Маккавеев В.М. Вопросы структуры осредненного поля скоростей турбулентных водных потоков // Тр. ГГИ. Вып. 22 (76). 1950.
13. Маслоу С.А. Неустойчивость и переход в сдвиговых течениях // Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности / Под ред. Х. Суинни, Дж. Голлаба. М.: Мир, 1984. С. 218–270.

14. *Машкович С.А., Вейль И.Г.* О влиянии точности данных о горизонтальной структуре тропического циклона на численный прогноз его перемещения // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 14–20.
15. *Мискевич И.В., Алабян А.М., Демиденко Н.А. и др.* Формирование высокой мутности вод в малых приливных эстуариях Белого и Баренцева морей // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2022. Т. 4. С. 142–153.
16. *Мискевич И.В., Алабян А.М., Коробов В.Б. и др.* Исследования короткопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря (28 июля – 15 августа 2016 г.) // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 369–373.
17. *Михайлов В.Н.* Динамика потока и русла в не-приливных устьях рек. М.: Гидрометеиздат, 1971. 260 с.
18. *Монин А.С.* Предисловие к русскому изданию книги В. Старра “Физика явлений с отрицательной вязкостью”. М.: Мир, 1971. С. 5–8.
19. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 1. М.: Наука, 1965. 640 с.
20. *Обухов А.М.* О распределении энергии в спектре турбулентного потока // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1941. № 4–5.
21. *Панченко Е.Д.* Моделирование проникновения осолоненных вод в устья малых рек бассейна Белого моря // Моря России: исследования береговой и шельфовой зон. Севастополь, 2020. С. 454–456.
22. *Слезкин Н.А.* Динамика вязкой жидкости. М.: Гостехиздат, 1955. 512 с.
23. *Старр В.* Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. 261 с.
24. *Терский П.Н., Панченко Е.Д., Горин С.Л. и др.* Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 1006–1008.
25. *Фидман Б.А.* Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
26. *Форхгеймер Ф.* Гидравлика. М.; Л.: ОНТИ, 1935. 616 с.
27. *Arakawa H.* On the time rate of work done by the eddy stresses in the free air, and the maintenance of westerlies in middle latitudes // J. Meteorol. 1953. 10. № 5. P. 392–393.
28. *Boussinesq J.* Theorie de l’ecoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section. Paris: Gauthier-Villars, 1897. 88 p.
29. *Charney J.G.* On the physical basis for numerical prediction of large scale motions in the atmosphere // J. Meteorol. 1949. № 6. P. 371–385.
30. *Lorenz E.N.* Interaction between a mean flow and random disturbances // Tellus. 1953. V. 5. № 3. P. 238–250.
31. *McDowell D.M., O’Connor B.A.* Hydraulic behavior of estuaries. London: Macmillan Press., 1977. 292 p.
32. *Panchenko E., Alabyan A.* Friction factor evaluation in tidal rivers and estuaries // METHODSX. 2022. V. 9. P. 101669. DOI: 10.1016/j.mex.2022.101669
33. *Reynolds O.* On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion // Philosophical transactions of the Royal Society. 1884. A. CL 26. 123 p.