

7. Проект Правил использования водных ресурсов Цимлянского водохранилища // Северо-Кавказский филиал ФГУП РосНИИВХ, Новочеркасск, 2012.

8. Дубинина В.Г. Гидрологический режим поймы Нижнего Дона и проблемы рыбохозяйственного использования водных ресурсов реки. Автореф. дисс. канд. геогр. Ростов-на-Дону. Гос. Унив. 1969. 31 с.

9. Дубинина В.Г. Рациональное использование водных ресурсов Дона с учетом рыбохозяйственных требований // Водные ресурсы. № 3. 1978. С. 67-82.

10. Дубинина В.Г., Баскакова Т.Е. Обоснование требований рыбного хозяйства к объему, режиму и частоте попусков в нижний бьеф Цимлянского гидроузла // Отчет НИР АзНИИРХ. ИНВ. №7720. Ростов-на-Дону. 1989. 31 с.

11. Нормативы допустимого воздействия на водные объекты бассейна р. Дон // Утверждены Росводресурсы 28.12.2012.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОРСКИХ И РЕЧНЫХ ВОД В УСТЬЯХ ПРИЛИВНЫХ РЕК (на примере устья р. Кеми)**

Зырянов В.Н.<sup>1</sup>, Чебанова М.К.<sup>1</sup>, Филатов Н.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Институт водных проблем Севера Кар.НЦ РАН, г. Петрозаводск  
eiek@inbox.ru

Для устьев рек, где взаимодействуют две различные водные массы – речная и морская, характерно особое гидрологическое явление – проникновение (интрузия) морских (соленых или осолоненных) вод в реки, рукава дельт. Дальность проникновения морских вод в устья рек зависит от: величины речного стока, амплитуды прилива и морфометрии устья.

Процессы смешения морских и речных вод и эстуарная стратификация водной толщи определяются стратификацией вод и типом вертикального перемешивания и играют определяющую роль в формировании маргинальных фильтров. Для математического моделирования случаев полного и частичного перемешивания используется уравнение диффузии-адвекции с постоянными коэффициентами турбулентного обмена, которое, как показывает практика, плохо работает для случаев слабого перемешивания (сильной стра-

тификации) вод [1]. Для оценки длины клина в условиях слабого перемешивания применяются различные соотношения на основе гидрофизических критериев. Обычно – это степенные зависимости от плотностного числа Фруда.

Мелководные области приливных морей оказываются в так называемой зоне закритических глубин, при которых очень существенным становится трение. Теоретические и экспериментальные исследования приливных течений на мелководьях показали, что в закритической области глубин имеет место градиентно-вязкий режим течения, когда в уравнении сохранения импульса баланс осуществляется, главным образом, между горизонтальным градиентом давления и напряжением турбулентного трения [2, 3].

Градиентно-вязкая теория интрузии морских вод в устья рек дает следующее выражение для формы стационарного клина морских вод [2]:

$$x = \frac{1}{4R} \left[ \frac{1}{2}(q_0^4 - q^4) - (q_0^3 - q^3) + \frac{3}{4}(q_0^2 - q^2) + \frac{1}{4}(q_0 - q) + \frac{3}{8} \ln \frac{3-2q_0}{3-2q} \right], (1)$$

где  $q = \eta/H$ ,  $R = \frac{3AS_R}{4g\delta H^4}$ .

В уравнении (1):  $\eta(x,t)$  – толщина слоя морских вод,  $H(x)$  – рельеф дна  $g^*$  – ускорение свободного падения,  $A$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $S_R$  – удельный расход реки (полный поток),  $\delta = (\rho_S - \rho_R)/\rho_R$ ,  $\rho_S$  – плотность морской воды,  $\rho_R$  – плотность речной воды,  $q_0 = q|_{x=0} = D/H$ ,  $D$  – толщина соленостного клина в устьевом створе известна и равна  $D$ .

Как следует из (1), при расчетах формы клина и дальности проникновения морских вод в устья рек необходимы граничные условия – толщина клина морских вод в какой-нибудь точке зоны смешения речных и морских вод. В качестве такой граничной точки, как правило, выбирают устьевой створ реки. Само понятие устьевого створа реки далеко неоднозначно, обычно под этим понимают поперечное сечение реки, после которого устье начинает расширяться в сторону моря.

На сегодняшний день существуют только два способа задания толщины соленостного клина в устьевом створе: первый – непосредственно по данным наблюдений, второй – по формуле Кейлега-

на [2], полученной им эмпирически по данным лабораторных экспериментов в лотке:

$$\bar{D} = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{v_r}{v_\Delta} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (2)$$

где  $v_r$  – средняя скорость речного потока,  $v_\Delta$  – фазовая скорость гравитационных волн на поверхности раздела соленой и пресной вод [4]:

$$v_\Delta = \sqrt{gH_0 \frac{\rho_s - \rho_r}{\rho_r}}. \quad (3)$$

Соотношение (2) является эмпирической формулой, полученной по данным экспериментальных измерений в лотке. Использование формулы (2) зачастую приводит к неверным расчетам толщины клина морских вод в устьевых створах рек. Проблема описания динамики взаимодействия речных и морских вод обычно искусственно разделяется на две задачи: первая связана с расчетом зоны интрузии морских вод в устье реки (соленостный клин), вторая – с динамикой растекания речных вод в морской акватории (речные плюмы). Как правило, эти задачи рассматривают отдельно, и в той, и в другой задаются условия в устьевом створе реки. На самом деле, задачи неразрывно связаны между собой и на границе их стыковки в устьевом створе должны выполняться условия сопряжения урвненной поверхности и толщины слоя морских вод (рис. 1).

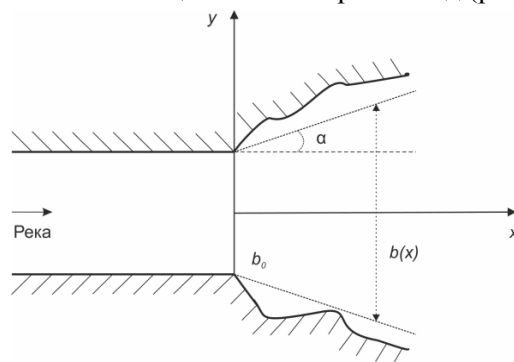


Рис. 1– Схема зоны устьевого створа в плане

Используя эту идею (рис. 1), можно получить уравнение для  $q_0$  в устьевом створе:

$$q_0(1 - q_0)^3 = P(3 - 2q_0), \quad (4)$$

где

$$P = \frac{3AV_R b_0}{4\delta(2\gamma g H^3 + 3AV_R b_0)}. \quad (5)$$

В уравнении (5):  $V_R$  – средняя скорость реки,  $Q_R$  – полный расход реки,  $h(x)$  – толщина речного потока в плюме,  $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$ , где  $\alpha$  – угол бокового растекания,  $b_0$  – ширина реки в устьевом створе,  $H(x)$  – рельеф дна (средняя глубина),  $g$  – ускорение свободного падения,  $A$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $\delta = (\rho_S - \rho_R) / \rho_R$ ,  $\rho_S$  – плотность морской воды,  $\rho_R$  – плотность речной воды.

Параметр  $P$ , предложенный выше, может использоваться для характеристики процессов смешения в сильно стратифицированном эстуарии наравне с прочими гидрофизическими параметрами. С помощью параметра  $P$  можно аналитически, а не эмпирически определять толщину соленостного клина – характеристику, необходимую для расчета интрузии соленых вод в эстуарий.

Решив уравнение (4) графически и выбрав нужную ветвь корней, можно получить график второй ветви корней этого уравнения  $q_0^{(2)} = f_2(P)$ . Таким образом, для того, чтобы теперь найти толщину клина морских вод в устьевом створе реки необходимо вычислить для данной реки параметр  $P$  по (5), далее по этому значению  $P$  из графика на рис. 2 определить  $q_0$ .

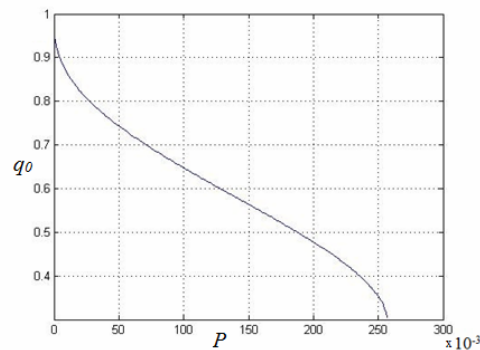


Рис. 2 – График корней уравнения (4)  $q_0^{(2)} = f_2(P)$

Итак, можем написать формулу для толщины клина в устьевом створе как аналог формулы Кейлегана:

$$q_0 = D / H = f_2(P). \quad (6)$$

**Приложение теории к интрузии морских вод в устье реки Кемь.** На рис. 3 представлен результат расчета клина морских вод в устье р. Кемь по формуле (1). Значения параметров р. Кемь, использованные для расчета, представлены в табл. 1. Точками (\*,+) показано положение изогалины 6‰, полученное по данным наблюдений во время прилива и отлива, соответственно.

Таблица 1 – Значения параметров при расчете соленостного клина в устье реки Кемь [4]

$H_0$ , м	$\rho_m$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_p$ , г/см <sup>3</sup>	$\bar{D}$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$v_p$ , м/с	$B$ , м	$\bar{Q}$ , м <sup>2</sup> /с
3	1.0194	1.000015	2.2	275	0.11	800	0.3438

Дальность проникновения морских вод в устье реки определяется их полным выклиниванием, т.е. нулевым значением толщины нижнего слоя  $\eta = 0$ . Сравнение реального хода изогалин и рассчитанной по формуле (1) формы соленостного клина дает возможность сделать вывод, что использование градиентно-вязкой теории для решения задачи о глубине проникновения соленых вод дает хорошие результаты.

Представленный на рис. 3 соленостный клин рассчитан по теории стационарного клина по осредненным за период прилива характеристикам. Однако в устье р. Кемь соленостный клин является приливным и осредненное за приливный цикл положение клина не одно и то же, что его расчет по осредненным за прилив характеристикам. Осредненное за приливный цикл положение соленостного клина оказывается длиннее стационарного, т.е. стационарный клин дает заниженные значения глубины интрузии морских вод в устья приливных морей. Разница обусловлена нелинейностью процесса, проявлением которой является пампинг-эффект (эффект накачки) [5]. Для колебательных процессов, описываемых нелинейными уравнениями параболического типа, характерно проявление пампинг-эффекта – эффекта повышения (или понижения) среднего значения описываемой физической характеристики на бесконечности относительно среднего значения этой характеристики на границе области [5]. На рис. 3 показано положение соленостного клина в приливном устье Кеми с учетом эффекта приливной накачки (пампинг-эффекта).

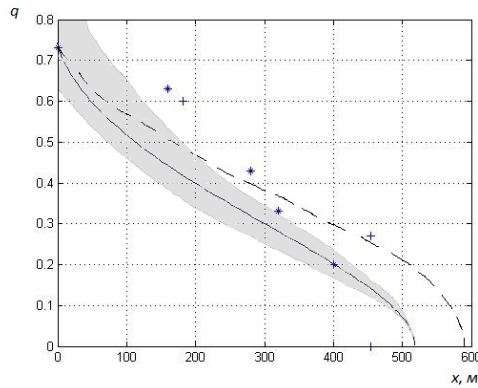


Рис. 3 – Теоретическая форма клина по формуле (1).

Пунктир - среднее положение клина за приливной цикл с учетом пампинг-эффекта

По данным наблюдений в устье р. Кемь в Белом море обнаружены некоторые особенности взаимодействия морских и речных вод, которые представляют интерес для приложения гидродинамической теории, например, форма клина морских вод. До сих пор в нашем представлении клин морских вод имел выпуклую форму с отрицательным знаком кривизны (выгнут вверх). Такая форма, в частности, была получена в работе [2]. Однако данные гидрологического разреза в устье Кеми показывают, что клин имеет более сложную структуру и состоит из двух участков с разными знаками кривизны его поверхности.

Во время экспериментальных работ в этом устье была зафиксирована ступенчатая структура вертикальных распределений температуры, солености, плотности, но не мелкомасштабные, а одна, максимум две, крупномасштабные ступеньки хорошо перемешанной жидкости толщиной до 3-х метров. Это явление обусловлено слоем смешения на границе речных и морских вод и его движением вместе с клином. Вдоль поверхности соленостного клина формируется слой смешения (рис. 3), где помимо турбулентного перемешивания, большую роль играет процесс вовлечения. В слое смешения за счет образования локальных вихрей из-за сдвига скорости течения происходит процесс быстрого выравнивания солености и температуры поперек слоя. Как следствие, на вертикальных распределениях солености образуется ступенька. С приливом происходит перемещение клина морских вод и вместе с ним слоя смешения. В результате через точку наблюдения с отливом будет проходить по-

следовательно морская вода, затем вода слоя смешения, затем речная вода, с приливом – все в обратной последовательности.

Были обнаружены долгопериодные волновые колебаний солености в придонной области, которые не удавалось объяснить классической теорией внутренних волн. Устье реки Кемь – мелководная зона с глубинами меньше критической, трение здесь является существенным, следовательно, использование теории волн в идеальной жидкости для описания внутренних волн на клине будет явно некорректным. Необходимо пользоваться вязкой теорией волновых колебаний в двухслойной жидкости [2, 3], которая на соленостном клине [2] дает приемлемое объяснение обнаруженным колебаниям с периодом около 4-х часов. В изменениях придонной солености отчетливо прослеживаются периодические колебания с вышеуказанным периодом. Значения частоты Вьясля-Брента дают периоды внутренних волн в невязкой жидкости на клине максимум несколько минут, а в придонной области – 21-23 мин. Поэтому колебания с периодами около 4 часов не могут быть описаны в рамках теории внутренних волн в невязкой жидкости. Так как зона взаимодействия речных и морских вод в устье Кеми составляет несколько километров, стоит ожидать такого же порядка длин волн на клине.

**Выводы.** Развитая в работе гидродинамическая теория интрузии морских вод в устья рек позволила более точно описать форму клина морских вод. Показано, что поверхность клина не обязательно должна быть выпуклой, а может состоять из участков с разными знаками кривизны.

Предложенный метод вычисления значений толщины клина в устьевом створе на основе условия сопряжения уклонов поверхности клина в створе и слоя морских вод в речном плюме в море дал возможность определять эту необходимую для расчета интрузии морских вод характеристику аналитически. Периодическое появление ступенчатой структуры на вертикальных профилях солености в приливном цикле обусловлено слоем смешения на границе речных и морских вод и его движении вместе с клином.

Вязкость оказывает определяющее влияние на процессы в мелководных зонах приливных морей при глубинах меньше критических. Это подтверждается существованием долгопериодных волновых колебаний на границе речных и морских вод, частоты которых оказываются вне диапазона внутренних волн в невязкой жидкости.

### Литература

1. Михайлова М.В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6, с .
2. Зырянов В.Н. Гидродинамика соленостного клина // Водные ресурсы. 1987. № 6, с. 107 - 125.
3. Зырянов В.Н. Топографические вихри в динамике морских течений. Москва: ИВП РАН. 1995, 240 с.
4. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов/ Под ред. Н.Н.Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 349 с.
5. Зырянов В.Н., Хубларян М.Г. Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // ДАН, 2006, т. 408, № 4, С. 535-538.

### ОХРАНА И ОЧИСТКА ВОД МЕТОДАМИ ФИТОТЕХНОЛОГИЙ

Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н.  
Институт водных проблем РАН, г. Москва  
kazm@pochta.ru

Фитотехнологии, в основе которых лежит использование высшей водной растительности (ВВР) и сопутствующих ей микроорганизмов, находят все большее применение для охраны, очистки и доочистки вод, а также экологической реконструкции водных объектов в разных регионах мира как с теплым, так и с холодным климатом. В США искусственные ветленды рассматриваются как составная часть системы устойчивого развития и возобновляемого природопользования. В Агентстве охраны окружающей среды США (U.S. Environmental Protection Agency) эта тематика является приоритетной на длительную перспективу и разрабатывается Национальной исследовательской лабораторией управления рисками (National Risk Management Research Laboratory) в целях предотвращения угроз здоровью людей и окружающей среде. Исследования и разработки по этой тематике являются приоритетными и в странах-членах Евросоюза, прежде всего для устойчивого обеззараживания и очистки промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных сточных вод [1]. В целом исследования в этом направлении проводятся в более чем 80 странах, в основном в Северной Америке, Европе, Юго-Восточной Азии и Океании. С 1991 г. на эту тему в