

В.Я. Илюшин, канд. геогр. н.

Одесский государственный экологический университет

РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВОД ВЗМОРЬЯ В ДЕЛЬТОВЫЕ ВОДОТОКИ В ХОДЕ НАГОННОГО ПРОЦЕССА В БЕСПРИЛИВНОЙ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ

Исследуется процесс вторжения соленых вод взморья в дельтовые водотоки в ходе градиентных и дрейфовых течений, при нагонах со стороны моря в неприливные участки дельтовых водотоков. Решение задачи приводится полностью. Показано точное решение уравнения вида $\varphi(U) = \int \sqrt{\frac{1-U}{U}} dt$, отсутствующее в справочнике Г.Б. Двайта (1977).

Разработан алгоритм практического использования результатов решения на примере реального устьевого водотока.

Ключевые слова: *нагон, фазы денивеляции, интегральная функция, градиентное течение, интрузия, дельтовый водоток.*

Введение. Гидродинамика водной толщи, подверженной нагонному воздействию ветра, сильно зависит от условий взаимодействия системы “атмосфера – гидросфера - литосфера”. В научной литературе предложено много математических моделей, описывающих процесс изменчивости нагонного уровня и гидродинамику нагонного слоя воды. Удовлетворительный аналитический результат, проясняющий механизм явления для озер, водохранилищ и прибрежных зон морей, получен А.В. Караушевым [1,2]. Аналитическое решение Караушева удовлетворительно характеризует механизм установившейся фазы нагона: неплохо согласуется с данными натурных наблюдений [3] для конкретных условий возникновения нагона (при подборе коэффициентов для этого нагона). Общей трудностью, при аналитическом рассмотрении модели нагонного процесса является обстоятельство, связанное с невозможностью определения линии “нулевых скоростей”, разделяющей толщу воды на слои (ячейки) с противоположно направленными скоростями в произвольном водном сечении потока, отмечается в [4].

В исследовании автора статьи [4] гидравлическая модель явления позволяет обойти трудность, связанную с “поверхностью нулевых скоростей” и рассмотреть денивеляцию водной поверхности в ходе трехфазного нагонного процесса на устьевом участке реки. Разработанная модель процесса нагона на устьевых участках рек используется в отсутствие значительных приливов и при известных морфометрических характеристиках русел дельтовых водотоков и заданных статистических параметрах нагонов. Картина денивеляции водной поверхности на устьевом участке реки, при трехфазном изменении уровня на нем, в соответствии с рассматриваемой моделью процесса, может быть представлена семью специфическими фазами, позволяющими определять продолжительности фаз и изменение уклона водной поверхности в течение их длительности, выполнить расчет вторжения вод взморья в речные русла дельты по известному уклону и длительности фазы нагона на устьевом участке реки. При вторжении со стороны моря волны нагона, на устьевом участке в первой фазе процесса образуется отрицательный уклон. Эта фаза нагона характеризуется ростом уровня в устьевом створе реки, постоянному уклону на охваченном нагоном участке и обратному градиенту давления (при интенсивном нагоне), к обратному градиенту давления в дельтовом водотоке и интрузии соленых вод взморья в водоток. При слабых нагонах образуется прямой уклон, стоковое течение при этом ослаблено.

Итоговая скорость поступления вод взморья на устьевой участок, в этом случае, равна сумме дрейфового и обратного градиентного течения; дрейфовые течения изучены достаточно, [5,6,7]. Такой заток соленых вод взморья возможен также во вторую фазу: вторую фазу нагонного процесса характеризует постоянный нагонный подпор в устье и переменный обратный уклон, уменьшающийся до нуля в конце второй фазы. Эта фаза определяется как завершающая период обратного градиентного течения. В процессе нагона на устьевом участке реки, в отсутствие приливов, дрейфовое течение сохраняется в третьей и четвертой фазах денивеляции урвеной поверхности при перемещении волны нагона со стороны моря в дельтовый водоток.

Объект исследования. Исследуется процесс вторжения осолоненных вод взморья в ходе градиентных и дрейфовых течений, при нагонах со стороны моря в неприливные участки дельтовых водотоков. Работа является теоретическим исследованием. Решение задачи приводится полностью, поскольку в известном справочнике Г.Б.Двайта [8] нет рекомендаций о работе с эксклюзивной функцией полученной в статье. Пример расчета градиентных и дрейфовых течений в процессе нагона с моря выполнен применительно к гидрологическим условиям Нижнего Днепра. При этом обозначения приняты согласно [4], поскольку статья представляет, по своей сути, продолжение этой работы.

Метод исследования. Исследование выполняется исходя из самых общих представлений о нагонах на устьевых участках, как трехфазных процессах имеющих фазу развития (собственно нагон воды), установившуюся фазу (баланс притока и оттока воды на нагонном участке) и фазу затухания процесса (разгрузки воды с нагонного участка), именуемой фазой ликвидации нагона. Применительно к схеме развития нагонного процесса, изложенной в предыдущей статье, приведен расчет поступления в реку солоноватых вод за счет обратно-градиентного и дрейфового течений.

Дрейфовое течение охватывает поверхностные слои воды. Даже при отсутствии стоковых течений дрейфовый перенос проникает, по данным А.С. Судольского [6,7], до горизонта $0,32 H$ (H -глубина водного слоя). Согласно теоретическому исследованию В.Б. Штокмана [9] линия раздела между дрейфовым течением и противоположным компенсационным лежит на $1/3$ глубины и т.д., что не противоречит современным данным Б.И. Самолюбива, [10]. При наличии дополнительного стокового течения - последнее, разумеется, несколько отжимает дрейфовый поток к поверхности. Но в случае, когда дрейфовое течение развивается на фоне обратного градиентного, вполне возможно, что слой, находящийся под ветровым воздействием окажется более значительным – до $0,4 H$, а может быть и больше. Именно такую глубину может иметь дрейфовое течение в 1-й и 2-й фазах нагонного процесса. В третьей фазе глубина распространения дрейфа, видимо, очень быстро падает (до $0,2 - 0,3 H$), а со временем становится еще меньшей. Поскольку дрейфовое течение имеет поверхностный характер, казалось бы, оно переносит в реку только почти пресные поверхностные воды взморья и, следовательно, не является фактором осолонения речных вод. Однако данные наблюдений говорят о другом: соленость поверхностных вод достигает иногда 3000 мг/л [8,11], приближаясь к солености придонных вод. Но так как данных о распределении солености в устье во время сгонно-нагонных процессов совершенно недостаточно, то, чтобы не сделать ошибки в нежелательном направлении, можно приближенно допустить полное перемешивание у входного створа дельты, то есть определить соленость вод ветрового переноса как полу сумму бытовых соленостей у дна и на поверхности.

Обратное градиентное течение, как отмечалось, может охватить все или почти все сечение потока. По сравнению с дрейфовым оно обладает и большей мощностью и

большей скоростью, почему перенос солей в русла дельты обусловлен, главным образом, за счет ОГТ (обратное градиентное течение). Поэтому анализ обратного градиентного течения в данном случае наиболее важен.

Результаты исследования. Рассмотрим основной вопрос – определение дальности проникновения соленых вод в русловую систему в ходе нагонного процесса.

Скорость ОГТ можно определить по формуле

$$V = C\sqrt{\varepsilon \cdot H \cdot I} = C\sqrt{\varepsilon \cdot H} \cdot \sqrt{\frac{a_n}{V_\varepsilon} - I_0}. \quad (1)$$

Здесь ε – коэффициент равный отношению глубины пояса, охваченного ОГТ, к полной глубине живого сечения H . Величину H можно уточнить, добавив среднюю высоту нагона. В соответствии со сказанным ранее, приближенно можно положить $\varepsilon=1$; a_n – скорость подъема уровня (м/ч), I – бытовой уклон, по [4].

Дальность перемещения солоноватой воды взморья в русловую систему дельтовых водотоков за первую фазу (l_1 , км) равно

$$l_1 = \int_0^{T_1} V dt = 3,6\sqrt{H} \cdot \sqrt{\frac{a_n}{V_\varepsilon} - I_0} \cdot T_1. \quad (2)$$

Здесь T_1 – длительность первой фазы, равно времени подъема уровня в устьевом створе, выражено в часах, а V_ε в км/ч.

Путь добегаания на момент t в течение второй фазы, (по [4] $I_t = \frac{\Delta h_{нз} - I_0 \cdot V_\varepsilon \cdot t}{L_t} = \frac{\Delta h_{нз}}{V_\varepsilon \cdot t} - I_0$), получим так

$$\Delta l_t = \int_{T_1}^t V dt = \frac{C \cdot \sqrt{H}}{\sqrt{V_\varepsilon}} \cdot \int_{T_1}^t \sqrt{\frac{\Delta h_{нз} - V_\varepsilon \cdot I_0 \cdot t}{t}} dt. \quad (3)$$

Чтобы освободить подынтегральное выражение от постоянных множителей, используем подстановку

$$U = \frac{I_0 \cdot t}{\Delta h_{нз}} \cdot V_\varepsilon, \quad (4)$$

где U – безразмерная переменная. Тогда $t = \frac{\Delta h_{нз} \cdot U}{V_\varepsilon \cdot I_0}$ и $dt = \frac{\Delta h_{нз} \cdot dU}{V_\varepsilon \cdot I_0}$. Подставляя в (3) значения t и dt , выраженные через U , после преобразования получим

$$\Delta l_t = \frac{C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{V_\varepsilon \cdot \sqrt{I_0}} \cdot \int_{U_{T_1}}^{U_t} \sqrt{\frac{1-U}{U}} dU. \quad (5)$$

Обозначим интегральную функцию через $\varphi(U)$, то есть положим

$$\varphi(U) = \int_{U_{T_1}}^{U_t} \sqrt{\frac{1-U}{U}} dt. \quad (6)$$

В таком случае предыдущее равенство переписывается так

$$\Delta l_t = \frac{C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{V_\varepsilon \cdot \sqrt{I_0}} [\varphi(U_t) - \varphi(U_{T_1})] \quad (7)$$

Выражая Δl_t в км, V_ε – в км/ч, H и $\Delta h_{нз}$ – в м, имеем

$$\Delta l_t = \frac{3.6C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{V_\varepsilon \sqrt{I_0}} \cdot [\varphi(U_t) - \varphi(U_{T_1})] \quad (7')$$

Эксклюзивный интеграл (6) берется при помощи двойной подстановки (в справочном материале [8] нужные рекомендации отсутствуют). Сначала положим $\frac{1-U}{U} = Z^2$, откуда $U = \frac{1}{Z^2 + 1}$ и $dU = -\frac{2ZdZ}{(Z^2 + 1)^2}$. Подставляя значения dU и $\frac{1-U}{U}$ в (6), получаем

$$\varphi(U) = \int \sqrt{\frac{1-U}{U}} dU = -2 \int \frac{Z^2 dZ}{(Z^2 + 1)^2}.$$

Теперь сделаем подстановку $z = tgy$. В таком случае $1 + z^2 = 1 + tg^2 y$ и $dz = \frac{1}{\cos^2 y} dy$. Следовательно, $\varphi(U) = -2 \int \frac{tg^2 y dy}{(1 + tg^2 y) \cos^2 y}$. Но $1 + tg^2 y = \frac{1}{\cos^2 y}$ и $tg y = \frac{\sin^2 y}{\cos^2 y}$. Отсюда после преобразований имеем

$$\varphi(U) = -2 \int \sin^2 y dy = -\int (1 - \cos^2 y) dy = -y + \frac{1}{2} \sin 2y.$$

Заменяя y на z , получаем:

$$\varphi(U) = -arctg z + \frac{1}{2} \sin (2arctg z)$$

и, следовательно,

$$\varphi(U) = -arctg \sqrt{\frac{1-U}{U}} + \frac{1}{2} \sin (2arctg \sqrt{\frac{1-U}{U}}). \quad (8)$$

Значения $\varphi(U)$ по (6) представлены в виде расчетной кривой на рис. 1.

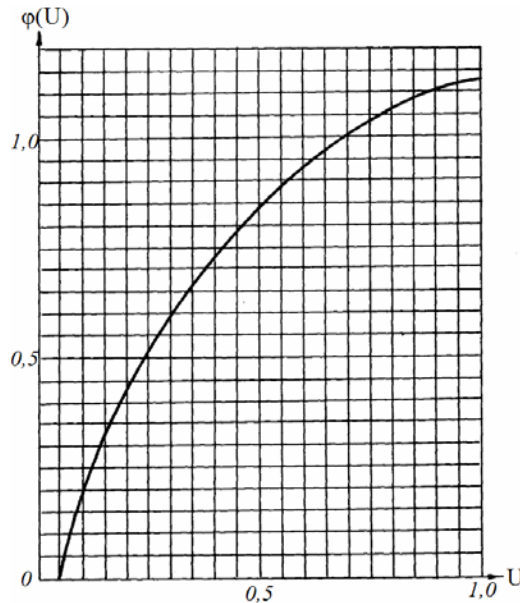


Рис. 1-Значения $\varphi(U) = \int \sqrt{\frac{1-U}{U}} dt$.

Для расчета Δl_t по (7') предварительно вычисляются безразмерные величины $U_{T_1} = \frac{V_6 \cdot I_0}{\Delta h_{нз}} \cdot T_1$ и $U_t = \frac{V_6 \cdot I_0}{\Delta h_{нз}} \cdot t$. Для этих значений по рис. 1 или по (8) определяются соответствующие величины $\varphi(U)$, что дает возможность рассчитать Δl_t

по формуле (7'). На момент T_2 окончания второй фазы, то есть прекращения обратного град течения, из (4), имея в виду $T_2 = \frac{\Delta h_{нз}}{V_э \cdot I_0}$ по [4], получаем $U = U_{T_2} = 1$ и $\varphi(U_{T_2}) = \varphi(1) = 1,13$. Таким образом, за вторую фазу путь добегаания соленых вод под влиянием обратного градиента давления составит величину

$$\Delta l_{T_2} = \frac{C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{1000 V_э \sqrt{I_0}} \cdot [1,13 - \varphi(u_{T_1})] \quad (9)$$

($V_э$ - в км/ч) или иначе

$$\Delta l_{T_2} = \frac{C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{1000 V_э \sqrt{I_0}} \cdot \left[1,13 + \arctg \sqrt{\frac{1-U_{T_1}}{U_{T_1}}} - \frac{1}{2} \sin(\arctg \sqrt{\frac{1-U_{T_1}}{U_{T_1}}}) \right]. \quad (10)$$

Суммарный путь добегаания $l_{огт}$ за первую и вторую фазы, то есть за все время обратного градиентного течения, получается как сумма l_1 по (2) Δl_{T_2} по (9) – (10)

$$\Delta l_{огт} = l_1 + \Delta l_{T_2} = V_{огт} \cdot T_1 + \frac{C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{1000 V_э \sqrt{I_0}} [1,13 - \varphi(U_{T_1})] \quad (11)$$

Расчет максимальной дальности обратного градиентного переноса осолоненной воды взморья (воды из зоны смешения речных и морских вод), выполнен не по максимальной (поверхностной), а по средней скорости, что мотивируется рядом соображений. Распределение скоростей по вертикали в обратном градиентном потоке совершенно не изучено, так как некоторые имеющиеся измерения дают, естественно, суммарную эпюру скоростей дрейфового и обратного градиентного течений. При этом вычисление разности скоростей на поверхности измеренных и предположительных дрейфовых обычно дает величины не резко отклоняющиеся от средней скорости по вертикали. Это связано с особенностями эпюры, имеющей максимум не на поверхности, а несколько ниже [2]. Если поверхностные скорости все же несколько больше средних скоростей, то преуменьшение за этот счет расчетной скорости может более или менее компенсироваться ошибкой обратного знака, связанной с допущением $\varepsilon=1$. Существует еще одно соображение: поверхностные струи в ходе поперечной циркуляции и турбулентного перемешивания, постепенно опускающиеся в средние, а затем придонные слои воды вновь поднимаются вверх и т.д. В ходе этого водообмена поверхностных и придонных слоев и за счет диффузии происходит некоторое обогащение растворенными солями нижних горизонтов за счет поверхностных. Поэтому вряд ли расчет по средней скорости, характеризующей перенос основной массы воды, даст существенное преуменьшение величины $l_{огт}$.

Для определения общей длительности проникновения соленой воды $l_{фсв}$ нужно, кроме $l_{огт}$, учесть также путь $l_{др.}$, проходимый частицами в ходе ветрового дрейфа

$$l_{фсв} = l_{огт} + l_{др.} \quad (12)$$

В данном случае для расчета переноса воды из зоны смешения (зоны открытого - море, или закрытого – лиман, взморья) целесообразно принять поверхностную скорость дрейфового течения. Это мотивируется наличием устойчивого максимума скорости на водной поверхности [6], на которую непрерывно воздействует тангенциальная сила ветра. Именно для поверхностной скорости были предложены формулы, которые можно использовать для расчета.

Общеизвестна теоретическая формула скорости волнового переноса (дрейфа), полученная Стоксом

$$V_{op} = \frac{h_g^2}{4} \sqrt{g \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3} . \quad (13)$$

Здесь V_{op} - поверхностная скорость в см/сек., h_g - высота ветровой волны в см, λ - длина волны в см.

Сопоставление формулы с данными исследований в аэрогидравлических лотках (Русловая лаборатория ГГИ), показало ее недостаточную точность [6].

Для морских дрейфовых течений В.В.Шулейкин [5] использует формулу

$$V_{op} = \frac{0.0127}{\sqrt{\sin \varphi}} \cdot \omega , \quad (14)$$

где ω - скорость ветра (равноразмерная с V_{op} .) и φ - широта.

Для Днепровского лимана $\sin \varphi = 0.725$ и

$$V_{op} = 0.015\omega \text{ м/сек} = 0,054\omega , \quad (14')$$

причем ω выражено в м/с.

Формулой (14) определяется скорость не на поверхности воды, а в приповерхностном слое мощностью D , в глубоком водоеме. В лиманах (Днепровском, Днестровском и др.) и русловых системах рек (Днепр, Днестр) общая глубина, конечно же, меньше глубины трения D , поэтому применимость этой формулы вызывает обоснованные сомнения.

Более пригодной для рассматриваемых условий является формула А.С.Судольского [6], полученная на основании довольно обширных натуральных наблюдений на водохранилищах, оз.Байкал, Яровом и др. водоемах. Формула эта имеет вид

$$V_{op} = 1,75\omega - 1.15 \text{ см/сек} = 0,063\omega - 0,041 , \quad (15)$$

где ω - скорость ветра в м/с.

В третьей фазе движение соленой воды вверх по реке возможно только дрейфом. Третья фаза характеризуется возникновением и непрерывным ростом положительного уклона водной поверхности нагонного клина воды [4]. Дрейфовое течение тормозится развивающимся стоковым. Результирующую скорость переноса соленой воды можно представить как разность

$$V_{расч.} = V_{op} - C\sqrt{HI_3} . \quad (16)$$

Необходимые для расчета I_3 и ΔT_3 берутся по (8) и (9) из [4].

Момент прекращения продвижения соленой воды вверх по реке $t = T_{кр}$ можно найти, положив в (16) $V_{расч.} = 0$. Из этого условия имеем

$$T_{кр} = \frac{\Delta h_{нз}}{V_g \left(I_0 - \frac{V_{op}^2}{C^2 H} \right)} . \quad (17)$$

При $T_2 < T_{кр} < T_4$ путь, который успеет пройти соленая вода за все время своего движения, можно определить по формуле

$$l_{ФВ, \max} = l_{ФВ, 1-2} + V_{op} (T_{кр} - T_2) - \frac{C\sqrt{H}\Delta h_{нз}}{V_g \sqrt{I_0}} \cdot \int_{T_2}^{T_{кр}} \sqrt{\frac{U-1}{U}} dU . \quad (18)$$

Интеграл, входящий в (18), берется как (6), имея сложное функциональное выражение.

Продвижение фронта соленой воды (ФСВ) за третью фазу в результате воздействия только дрейфовой скорости невелико по сравнению с величиной $l_{\text{ФСВ},1-2}$, а результирующие скорости $V_{\text{расч}}$ в начале фазы и наибольшего продвижения фронта известны ($V_{\text{расч}} = V_{\text{др.}}$ и $V_{\text{расч}} = 0$ соответственно). Поэтому наибольшее продвижение фронта соленой воды (ФСВ) можно определить по упрощенной формуле

$$l_{\text{ФСВ},\text{max}} = l_{\text{ФСВ},1-2} + \frac{2}{3} V_{\text{др.}} (T_{\text{кр.}} - T_2). \quad (19)$$

В случае если $T_{\text{кр.}} > T_3$, завершение переноса солей дрейфовым течением сдвигается на период четвертой фазы. Рассуждая подобно вышеизложенному, получим

$$l_{\text{ФСВ},\text{max}} = l_{\text{ФСВ},1-2} + \frac{2}{3} V_{\text{др.}} \left[T_3 - T_2 + T_n - \frac{1000 L_k}{a_n} \left(I_0 - \frac{V_{\text{др.}}^2}{3,6^2 C^2 H} \right) \right]. \quad (20)$$

Результаты теоретического рассмотрения вторжения осолоненных вод взморья в речные русла, в ходе нагонных процессов, покажем на примере гидрометеорологических и морфометрических условий развития этих процессов в северо-западной части Черного моря.

Схема расчета градиентного и дрейфового продвижения фронта соленых вод в глубь устьевой области Днепра, по реальным статистическим характеристикам нагонного процессов в этом районе (интенсивность подъема и спада уровня, длительность фаз подъема и спада, установившейся фазы процесса нагона со стороны моря и пр.), показан в табл. 1. Расчет интрузии более плотных вод взморья и дрейфовом заносе этих вод в речное русло, выполнен применительно к морфометрическим условиям днепровского дельтового судходного рукава Рвач, [12].

Заключение. Процесс проникновения соленых вод взморья в реку в ходе нагона представляет сложную гидравлическую задачу, теоретическое рассмотрение которой, как вариант, предложено в статье. При расчленении нагона на семь характерных фаз [4], интрузия соленых вод взморья в дельтовые водотоки наблюдается только в первую и вторую фазы сильных нагонов, в сумме с дрейфовым заносом соленых вод. В третью и четвертую фазы возможен только дрейфовый заток соленых вод. Дальность затока соленых лиманных вод в судходный рукав Нижнего Днепра, при средних статистических характеристиках нагонного процесса со стороны моря 0.50 м, не превышает 12.73 км.

Движение соленой воды при сгоне рассмотрим в следующих публикациях, а затем уже обратимся к завершающей фазе сгонно-нагонного процесса - фазе рассоления, восстановления в водотоках осолоненного устьевое участка реки прежних солевых условий.

Таблица 1 - Расчет параметров нагонной волны и продвижения фронта соленых вод в глубь устьевой области Днепра за 1-ю фазу T_1

Высота нагона $\Delta h_{НГ}$, м	Подъем		Общая продолжительность $T_{общ}$, ч	Продолжительность спада $T_{сп}$, ч	$T_{уст}$, ч	Уклон нагонной призмы J_1 (обратн.)	Скорость ОГТ $V_{огт} = 3,6\sqrt{HJ}$, м/ч (обратн.)	Скорость дрейфа $V_{д max}$, км/ч	1-я ступень		2-я ступень		Дальность добегаания ФСВ, км
	Интенсивность a , м/ч	Время $T_{п}$, ч, $T_{п}=T$							$V_{огт}+V_{д}$, км	Продолжит. T_1 , ч	скорость дрейфа, км/ч	X_1 , перемещение ФСВ, км	
0,50	0,12	4,1	24,0	5,9	14,0	0,0000043	0,79	0,86	1,6	2,42	0,29	2,65	6,65
0,40	0,12	3,3	24,0	4,7	16,0	-''-	0,79	0,68	1,47	2,72	0,23	0,84	4,84
0,225	0,075	3,0	72,0	4,3	64,7	0.0000015	0,47	0,36	0,83	4,82	0,12	<0	2,5
0,10	0,04	2,5	89,0	3,6	82,9	-0.0000006	-0,29	0,14	0	-	0,027		0
0,025	0,04	0,6	91,0	0,8	89,6	0,000000	-0,29	0,036	обратного течения нет	-	0,012		0

Расчет параметров нагонной волны и продвижения фронта соленых вод в глубь устьевой области за 2-ю фазу ΔT_2

Высота нагона $\Delta h_{НГ}$, м	Продол.ОГТ, по [4], T_2 (время от начала нг до конца 2й фазы)	Продолжит. 2й фазы ΔT_2 , ч, по [4]	$U_{T_1} = \frac{0,0502}{a}$	$\varphi(U_{T_1})$	1,13 - $\varphi(U_{T_1})$	Путь ОГТ за фазу Δl_{T_2} , км	Скорости дрейфа, км/ч			Продвижение ФСВ на конец 2й фазы $J_{ФСВ 1+2} = J_{ФСВ1} + \Delta J_{T_2} + V_{ср} \Delta T_2$
							в начале 2й фазы V_1	в конце 2й фазы V_2	средняя $V_{ср}$	
0,50	9,96	5,86	0,418	0,75	0,38	2,47	0,71	0,35	0,54	12,3
0,40	7,97	4,67	0,418	0,75	0,38	1,97	0,64	0,46	0,55	9,4
0,225	4,48	1,48	0,669	0,982	0,148	0,43	0,36	0,30	0,33	3,4

Расчет нагонной волны и продвижения фронта соленых вод в глубь устьевой области за 3-ю и следующие фазы процесса, при времени добегаания волны до плотины Каховской ГЭС - $T_k = 5,74$ часа

Высота нагона $\Delta h_{НГ}$, м	Продолжительность фаз						T_3	T_4	$\Delta J_{ФСВ3}$	$\Delta J_{ФСВ4}$	Наибольшее продвижение ФСВ $l_{ФСВ max}$, км	Время засоления в створе $x = 11$ км			
	1-й T_1	2-й ΔT_2	3-й ΔT_3	4-й $T_4=T_1$	5-й $\Delta T_5 = T_{уст}-T_k$	6-й $\Delta T_6=T_{сп}$						Фаза n	t_x , ч	t_n	$\sum t_\phi$
0,50	4,1	5,86	<0	4,1	8,26	5,9	-	2,2	-	0,43	12,73	2	8,0	2,0	169,0
0,40	3,3	4,67	<0	3,3	10,26	4,7	-	1,4	-	0,22	9,62	нет	-	-	-
0,225	3,0	1,48	1,26	3,0	58,96	4,3	4,6	≈ 0	0,02	-	3,42	нет	-	-	-

Список литературы

1. Караушев А.В. Исследование и расчет сгонно-нагонных денивеляций Цимлянского водохранилища // Труды ГГИ. -1957. –Вып. 66. -С. 17-50.
2. Караушев А.В. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. - Л.: Гидрометеиздат, 1960.-216с.
3. Кривошеева И.Т. Расчет сгонов и нагонов в устье Днепра // Труды УкрНИГМИ. - 1957.-Вып.9. -С. 3-22.
4. Ілюшин В.Я. Гидравлическая модель нагонного процесса в устьевой области реки //Вісник Одеського державного екологічного університету.- 2009. Вип.7. –С.217-223.
5. Шулейкин В.В. Физика моря. - М.: Изд-во Наука, 1968. –1083 с.
6. Судольский А.С. Исследование ветровых течений в аэрогидравлических лотках//Тр. ГГИ.- 1969. -Вып.173. –С. 49-66.
7. Судольский А.С. Ветровые течения на некоторых водоемах ограниченных размеров //Тр. ГГИ.- 1969.-Вып.169, -С. 123-158.
8. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы.- М.: Изд-во “Наука”, 1977. -224 с.
9. Штокман В.Б. Избранные труды по физике моря. - Л.: Гидрометеорологическое изд-во,1970.- 336 с.
10. Самолубов Б.И. Придонный плотностный поток при селективном водоотборе из верхнего бьефа Истринского водохранилища //Гидротехническое строительство. -2007. -№8. -С.42-48.
11. Ілюшин В.Я. Установившееся распределение концентрации солей в устьевых областях неприливых и слабоприливых рек //Сб. “Метеорология, климатология и гидрология”. -1976.-Вып.12. - С.36-42.
12. Костяницын М.Н. Гидрология устьевой области Днепра и Ю.Буга. - М.: Гидрометеиздат, 1961.-335с.

Розрахунок дальності проникнення вод узмор'я в дельтові водотоки в ході процесу наганання у без приливній гирловій області. Ілюшин В.Я.

Досліджується процес вторгнення солоних вод узмор'я в ході градієнтних і дрейфових течій, при нагананнях з боку моря в неприливні ділянки дельтових водотоків. Робота є теоретичним дослідженням. Рішення задачі доводиться повністю, оскільки у відомому довіднику Г.Б.Двайта немає рекомендацій про роботу з ексклюзивною функцією, отриманою в статті.

Ключові слова: процес наганання, фази, денівеляції, градієнтна течія, інтеграл ексклюзивної функції.

Calculation of the Distance of Coastal Waters Penetration into Delta Watercourses during the Pileup Process in a Tideless Estuarine Area. V.Ya.Ilyushin

The process of ingression of salt coastal waters is examined in the course of gradient and drift currents, under pileups from the sea in the tideless areas of delta watercourses. The paper is a theoretical research. The solution of the problem is proved exhaustively, as the renowned reference book by H.R. Dwight does not include recommendations on the work with an exclusive function received in the article.

Keywords: pileup process, phases, denivelation, gradient current, integral of an exclusive function.