

В.Я. Илюшин, к.г.н.

Одесский государственный экологический университет

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГОННОГО ПРОЦЕССА В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ РЕКИ

В исследовании предлагается гидравлическая модель нагонного явления в устьевом участке реки, позволяющая обойти трудность, связанную с “поверхностью нулевых скоростей” и рассмотреть денивеляции и уклоны водной поверхности на устьевом участке в ходе трехфазного нагонного процесса.

Ключевые слова: гидравлическая модель, нагонный процесс, фазы, денивеляции, уклон водной поверхности.

Введение. Нагонный процесс в море, водохранилище, лимане, на устьевом участке реки – чрезвычайно сложное явление. Гидродинамика водной толщи, подверженная нагонному воздействию ветра, сильно зависит от условий взаимодействия системы “атмосфера – гидросфера - литосфера”. В научной литературе предложено достаточно численных математических моделей, описывающих процесс, включая двумерные [1] – для оценки изменчивости нагонного уровня и трехмерные [2] – для характеристики гидродинамики в охваченной нагоном слое воды. Удовлетворительный аналитический результат, проясняющий механизм явления для озер, водохранилищ и прибрежных зон морей, получен А.В. Караушевым [3]. Все модели, как правило, удовлетворительно характеризуют установившуюся фазу явления нагона и неплохо согласуются с данными натурных наблюдений при решении обратной задачи для конкретных условий его возникновения [1,3]. Общей трудностью для численных и аналитических моделей является обстоятельство, связанное с невозможностью определения линии “нулевых скоростей”, разделяющей водную толщу на слои (ячейки) с противоположно направленными скоростями в произвольном сечении водного сечения области воздействия ветрового нагона.

Рассмотрение формирования нагонов в устьевых участках рек обнаруживает некоторые специфические особенности распределения скоростей в водном сечении, усложняющие решение задачи. Эти особенности происходят из не повторяющихся в своих деталях условий формирования конкретных нагонных процессов, чаще всего обусловленных ветровыми условиями района и локальными морфометрическими особенностями русел в конкретных устьевых областях. По данным наблюдений в натурных условиях выяснено, что поверхность, разделяющая противоположно направленные потоки, может быть вертикальной, наклонной или горизонтальной. Иногда таких поверхностей может быть в сечении потока несколько, рис.1.

Именно это обстоятельство не позволяет использовать эти модели для рассмотрения картины и механизма формирования нагонного процесса без последующей корректировки отдельных параметров модели (напряжения трения на границах “вода-воздух”, “вода-дно” и пр.) и получения хорошего соответствия расчетных характеристик нагонного уровня, уклонов водной поверхности и их значений в природе. При этом все-таки следует отметить, что И.Т.Кривошеева [4] для отдельных случаев формирования нагонного уровня и уклона водной поверхности в устьевой области Нижнего Днестра получила хорошее соответствие расчетных и натурных данных при определении параметров модели А.В.Караушева [5] обратным путем.

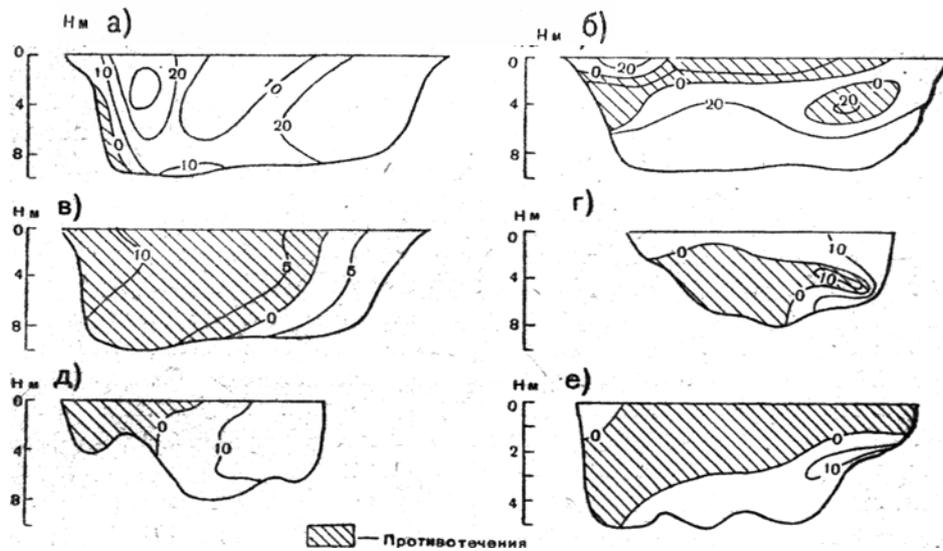


Рис. 1 - Противотечения при нагонах в рукавах дельты Днепра.
 а) Днепр (гидроствор Забич), 3 июня 1962 г., б) Днепр (гидроствор Забич), 11 июля 1962 г.,
 в) Днепр (гидроствор Забич), 15 апреля 1962 г., г) Новый Днепр, 5 октября 1961 г., д) Старый Днепр, 5 августа 1961 г., е) Кошевая, 5 августа 1961 г.

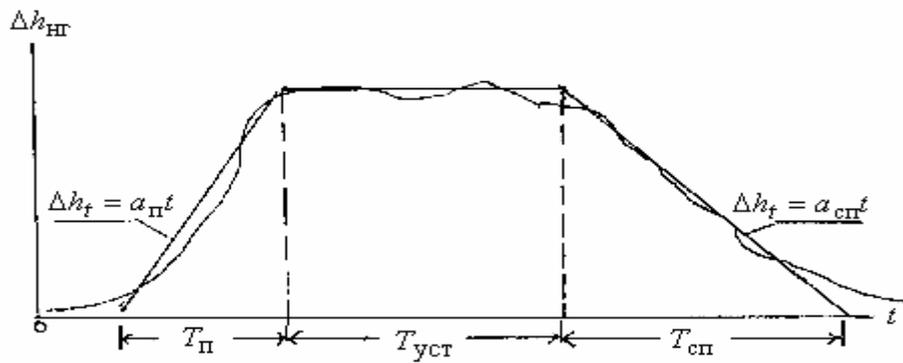


Рис. 2 - Схематизация изменчивости уровня воды $\Delta h_{нр}$ на устьевом участке реки в ходе нагонного процесса.

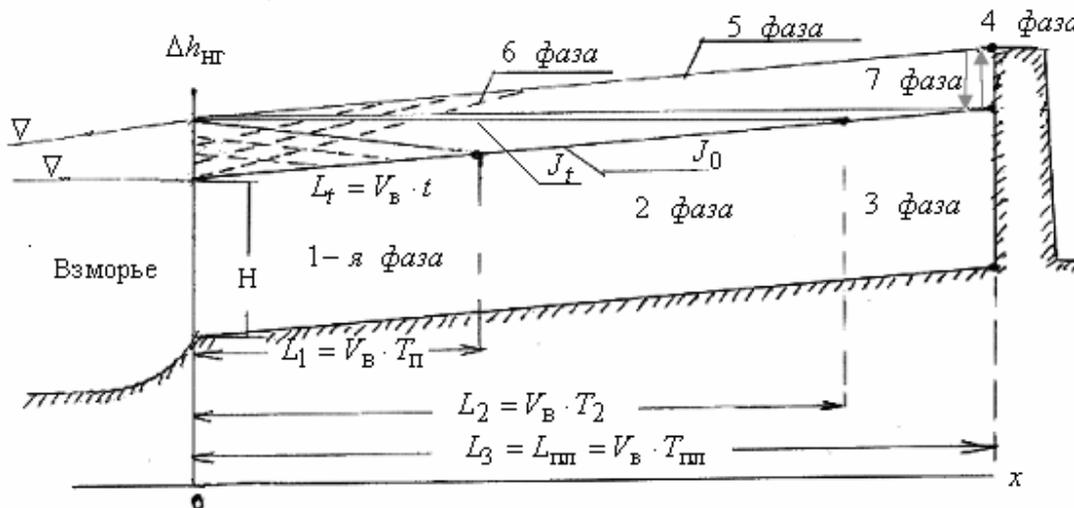


Рис.3 - Схема переформирования водного зеркала на устьевом участке реки в процессе нагона.

В исследовании предлагается гидравлическая модель явления, позволяющая обойти трудность, связанную с “поверхностью нулевых скоростей” и рассмотреть денивеляцию водной поверхности в ходе трехфазного нагонного процесса на устьевом участке реки. Идея обсуждалась с профессором А.Н.Бефани, которому эта статья посвящается.

Объект исследования. Исследуется процесс формирования нагонов в неприливном устьевом участке реки. Результаты обсуждаются на примере Нижнего Днепра. Работа является теоретическим исследованием.

Метод исследования. Исследование выполняется, исходя из самых общих представлений о нагонах на устьевых участках как трехфазных процессах (рис.2), 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.

Результаты исследования. Нагонный процесс на Нижнем Днестре возникает при длительном ветре, действующем на водную поверхность Днестровского лимана от западного сектора горизонта. В результате трения ветра о водную поверхность происходит перемещение масс лиманных вод в его восточный сектор. И в связи с тем, что пропускная способность русловой системы дельты Днестра - в первую очередь их общее поперечное сечение - меньше среднего поперечного сечения лимана, в их устьях происходит подъем воды со скоростью a . Этот подъем распространяется вверх по русловой системе реки с фазовой скоростью волны перемещения V_b . Если этот участок протяженностью больше, чем расстояние до Каховской плотины, то нагонный участок ограничивается плотиной Каховского водохранилища. Процесс нагона вод в русловую систему дельты проходит несколько фаз в своем развитии, как упоминалось выше, период развития нагона, период установившейся его фазы и период затухания или сброса нагонных вод в Днестровский лиман. Перемещение же волны нагона до плотины Каховского водохранилища (собственно нагон воды в русловую систему), установившейся его фазы, когда подъем уровня охватывает всю нагонную область, и обратное движение волны – спад уровня (сброс поступивших в ходе нагона лиманных вод из русловой системы нагонного участка Нижнего Днестра в лиман) - все это более сложный процесс. Денивеляции водной поверхности на нагонном участке составляют несколько специфических фаз в ходе нагонного процесса (рис.3), количество этих фаз может изменяться в зависимости от интенсивности нагона и протяженности нагонной области.

Первая фаза. Отвечает периоду развития нагона (T_n) т.е. $T_1 = T_n$. В течение этой фазы происходит равномерное распространение волны нагона (подпора) в речном русле вверх по течению. В некоторый момент t нагонный подъем уровня в устье Δh_t по сравнению с донагонным составит величину

$$\Delta h_t = a_n t, \quad (1)$$

где a_n - скорость подъема уровня в устьевом створе, м/с;

t - независимая переменная времени.

Дальность распространения нагонной волны L_t за время подъема равна

$$L_t = V_b t, \quad (2)$$

Где V_b - скорость распространения волны подъема вверх по течению, м/с.

В результате указанных движений относительно водной поверхности,

существующей до нагона, образуется обратный уклон ΔJ

$$\Delta J = \frac{\Delta h_t}{L_t} - \frac{a_n}{V_b}. \quad (3)$$

Следовательно, в течение первой фазы уклон не зависит от времени. Здесь возможны два случая:

$$1) \quad J_0 > \frac{a_n}{V_b}; \quad 2) \quad J_0 < \frac{a_n}{V_b}. \quad (4)$$

В первом случае общая скорость движения воды определяется разностью между стоковым (вниз к устью) и дрейфовым (ветровым, вверх по реке) течениями.

Во втором случае образуется отрицательный уклон, и итоговая скорость равна сумме дрейфового и обратного градиентного течения.

Итак, первая фаза нагонного процесса характеризуется ростом уровня в устьевом створе, постоянным уклоном на нагонном участке, обратным градиентом давления при интенсивном нагоне, что приводит к обратному градиентному течению, и прямым уклоном с ослабленным стоковым течением при слабых нагонах.

Вторая фаза. Возникает в случаях интенсивных нагонов, когда в первой фазе образуется обратное градиентное течение. В данной фазе подъем уровня в устье имеет постоянное (максимальное) значение. Поэтому обратный уклон в течение второй фазы сокращается от начального значения J_1 по (3) до нуля в конце фазы, т.е.

$$J_t = \frac{\Delta h_{нг} - J_0 V_b t}{L_t} = \frac{\Delta h_{нг}}{V_b t} - J_0. \quad (5)$$

Под воздействием этого сокращающегося во времени обратного уклона происходит обратное градиентное течение (ОГТ). Скорость этого течения станет нулевой в момент T_2 , удовлетворяющий условию $J_{T_2} = \frac{\Delta h_{нг}}{V_b T_2} - J_0 = 0$, т.е. при $J_0 = \frac{\Delta h_{нг}}{V_b T_2}$.

$$\text{Откуда:} \quad T_2 = \frac{\Delta h_{нг}}{V_b J_0}. \quad (6)$$

В момент T_2 поверхность воды в зоне подпора становится горизонтальной и прекращается ОГТ. Продолжительность второй фазы

$$\Delta T_2 = T_2 - T_1 = \frac{\Delta h_{нг}}{V_b J_{01}} - T. \quad (7)$$

Во второй фазе на ОГТ накладывается дрейфовое течение. В случае слабых нагонов, когда ОГТ нет уже в первой фазе процесса, отсутствует и вторая фаза.

Итак, вторую фазу нагонного процесса характеризует постоянный нагонный подпор в устье и переменный уклон, уменьшающийся до нуля в конце фазы. Эта фаза определяется как завершающая период обратного градиентного течения.

Третья фаза. Характеризуется возникновением и непрерывным ростом положительного уклона водной поверхности нагонного клина воды. Продолжительность фазы ΔT_3 измеряется разностью между периодом добегаания обратной положительной волны до плотины водохранилища и временем начала фазы

$$\Delta T_3 = T_{пл} - T_2. \quad (8)$$

В пределах нагонной области уклон водной поверхности в третьей фазе равен

$$J_3 = \frac{J_0 V_b t - \Delta h_{нг}}{L_t} = J_0 - \frac{\Delta h_{нг}}{V_b t}. \quad (9)$$

В течение фазы уклон J_3 изменяется от нуля, в начале фазы, до $J_0 - \frac{\Delta h_{\text{нр}}}{L_{\text{пл}}}$ в момент добегаания до плотины. В связи с этим восстанавливается и непрерывно усиливается стоковое течение, противоборствующее с дрейфовым; стоковое течение отжимает дрейфовое к поверхности, а затем полностью его нейтрализует. В этом смысле третья фаза является критической в развитии нагонного процесса – нагоном оказывается охвачен весь нижний участок реки. Если $T_{\text{пл}} < T_3$, третья фаза выпадает, вторая сменяется четвертой.

Четвертая фаза. Характеризуется нагонным подъемом уровней со всей области действия нагонного ветра (или до плотины) с одновременным формированием прямой волны к устьевому створу. Средний уклон водной поверхности выражается соотношением

$$J_t = \frac{\Delta \xi + a_n(t - T_{\text{пл}} - T_n)}{L_{\text{пл}}}, \quad (10)$$

где $\Delta \xi$ - разность отметок донагонных уровней в вершине нагонного участка и в устье. Продолжительность фазы $T_n = T_1$, поскольку допускается постоянство скорости добегаания нагонной волны, следовательно, перенос графика нагона из устья в глубь устьевой области без деформации. Из (10), при $t = T_{\text{пл}}$, на момент добегаания первой волны до конца нагонного участка, имеем

$$J_{(0+\text{пл})} = \frac{\Delta \xi - a_n T_n}{L_{\text{пл}}} = \frac{\Delta \xi}{L_{\text{пл}}} - \frac{\Delta h_{\text{нр}}}{V_b t_{\text{пл}}} = J_0 - \frac{\Delta h_{\text{нр,пл}}}{V_b t_{\text{пл}}}, \quad (11)$$

где $J_{(0+\text{пл})}$ - средний уклон на нагонном участке.

Если в формулу уклона за предыдущую фазу положить $t = T_{(0+\text{пл})}$, то получим вышеприведенное выражение (11); так как средний уклон в начале установившейся фазы нагона J_0 и в конце $J_{(0+\text{пл})}$ идентичны.

Итак, в конце четвертой фазы нагонного процесса уклон водной поверхности равен донагонному. Все глубины нагонного участка получают, согласно этой схеме, к началу следующей фазы постоянное приращение $\Delta h_{\text{нр}}$.

Пятая фаза. Рассматривается как период установившегося движения воды. Ей присущ постоянный нагонный подпор $\Delta h_{\text{нр}}$, на протяжении всего нагонного участка, и постоянный уклон, равный J_0 .

Продолжительность фазы ΔT_5 - это отрезок времени от установления максимального уровня в конце нагонного участка (или у плотины) ($t = T_n + T_{\text{уст}}$) до начала спада в устье, т.е.

$$\Delta T_5 = T_{\text{уст}} - T_{\text{пл}}. \quad (12)$$

Шестая фаза. Длительность $T_{\text{сп}}$ характеризуется спадом нагонных уровней в устье при сохранении установившегося течения в верхней части нагонного участка. С началом спада в устье образуется волна спада, распространяющаяся вверх по течению со скоростью V_b . Возникает клин спада с уклоном водной поверхности

$$J_6 = J_0 + \frac{\Delta h}{L_{t_6}}, \quad (13)$$

где L_{t_6} - путь, пройденный волной за время t_6 , считая от начала спада,

Δh - сработка уровня за время t_6 .

Если $a_n = \frac{\Delta h_{\text{нр}}}{T_n}$, $a_{\text{сп}} = \frac{\Delta h_{\text{нр}}}{T_{\text{сп}}}$, то имеем $\frac{a_n}{a_{\text{сп}}} = \frac{T_{\text{сп}}}{T_n} = k$. Для Нижнего Днепра $k = 1,43$.

Следовательно

$$J_6 = J_0 + \frac{a_n}{kV_B}. \quad (14)$$

Уклон в шестой фазе постоянен и больше донагонного - происходит сброс русловых нагонных вод в Днепровский лиман.

Итак, еще до прекращения нагона, лишь вследствие его ослабления (спада ветра) уклон становится больше донагонного и образуется течение повышенной скорости, возвратное относительно направления нагона.

Шестая фаза нагонного процесса завершается ликвидацией нагона в устье в момент

$$t = T_6 = T_n + T_{\text{уст}} + T_{\text{сп}}. \quad (15)$$

Седьмая фаза. В эту завершающую нагонный процесс фазу происходит сброс оставшихся в реке нагонных вод. Эта фаза возвратно-послесгонного течения со скоростями выше скоростей, соответствующих расходу во время нагона на Нижнем Днестре.

Уклон водной поверхности в течение седьмой фазы остается выше донагонного, изменяется от J_6 в начале фазы до J_0 – в ее конце.

Изложенная схема развития нагонного процесса позволяет выполнить расчет поступления в реку осолоненных лиманных вод за счет обратно-градиентного и дрейфового течений. Обратные градиентные течения можно оценивать по формуле Шези

$$V_{\text{расч}} = C \sqrt{HJ_{\text{фазы}}}, \quad (16)$$

где C - коэффициент Шези, H – глубина, соответствующая фазе нагона. Дрейфовое течение определяется, например, по формуле В.В.Шулейкина

$$V_{\text{др}} = \frac{0,0127W}{\sqrt{\sin \varphi}}, \quad (17)$$

где φ - широта, а W – одномерная скорость ветра. Для широты Днепровского лимана в северо-западной части Черного моря $\sin \varphi = 0.725$.

Поступление соленых лиманных вод в реку осуществляется в течение первой и второй нагонных фаз, в процессе обратного градиентного и дрейфового течений.

Выполненные расчеты перемещения фронта соленых вод в глубь устьевой области Нижнего Днепра по величинам средних скоростей течения и усредненным статистическим характеристикам нагонного процесса и при использовании результатов (1)-(16), показали, что при нагоне 0,50 м – перемещение ФСВ от своего положения в установившихся условиях составляет 12,73 км, при нагоне 0,40 м – 9,62 км, при нагоне 0,225 м – перемещение соленой воды вследствие возникновения обратных градиентных и дрейфовых течений составит 3,42 км. Доктор физ.мат.наук Самолюбив Б.И. по данным натуральных наблюдений на Истринском водохранилище получил устойчивое соотношение между максимальной и средней скоростью обратного градиентного течения, равном 1,23 при коэффициенте детерминации 0.86 [5]. Таким образом, расчетные значения перемещения фронта соленых вод в глубь устьевой области Днепра можно принять равными соответственно 15,66 км, 11,59 км и 4,20 км.

Выводы.

1. Разработанная гидравлическая модель нагонных процессов для районов

устьевых участков рек может использоваться в отсутствие значительных приливов и при известных морфометрических характеристиках русел дельтовых водотоков и заданных статистических параметрах нагонов.

2. Картина денивеляции водной поверхности в устьевом участке реки, при трехфазном нагоне и в соответствии с разработанной гидравлической моделью процесса, может быть представлена семью специфическими фазами, позволяющими выполнить расчет вторжения вод взморья в речные русла дельты.

3. Расчеты перемещения соленых вод в глубь устьевой области Нижнего Днепра показали, что при нагоне 0,50 м перемещение ФСВ от своего положения в установившихся условиях составляет 15.66 км, при нагоне 0,40 м – 11.59 км, при нагоне 0,225 м перемещение соленой воды вследствие возникновения обратных градиентных и дрейфовых течений составляет 4.20 км.

4. Уточнение модели возможно путем установления по учащенным наблюдениям за уровнем воды в устьевом участке реки величины скорости перемещения волны нагона вверх по этому участку, а также статистическим характеристикам параметров нагонного процесса. В ходе нагонного процесса в устьевом участке конкретной реки, по данным натурных наблюдений, желательно также находить устойчивые соотношения между максимальной и средней скоростью обратных течений.

Литература

1. Лонин С.А., Тучковенко Ю.С. Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.- Севастополь: НАН Украины, МГИ.-1993.-С.58-66.
2. Тучковенко Ю.С. Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. - Севастополь: НАН Украины, МГИ.-2003.-С.138-153.
3. Караушев А.В. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. -Л.: Гидрометеиздат, 1960.-216с.
4. Кривошеева И.Т. Расчет сгонов и нагонов в устье Днепра. // Труды УкрНИГМИ, вып.9. 1957.-С. 3-22.
5. Караушев А.В. Исследование и расчет сгонно-нагонных денивеляций Цимлянского водохранилища. // Труды ГГИ, вып. 66, 1957. –С.17-50.
6. Самолюбив Б.И. Придонный плотностный поток при селективном водоотборе из верхнего бьефа Истринского водохранилища // Гидротехническое строительство. 2007, №8. -С.42-48.

Гідравлічна модель процесу наганання в гирловій області річки. Ілюшин В.Я.

У дослідженні пропонується гідравлічна модель явища, що дозволяє обійти трудність, пов'язану з "поверхнею нульових швидкостей" і розглянути денівеляції водної поверхні на гирловій ділянці в ході трифазного процесу наганання.

Ключові слова: процес наганання, фази, денівеляції, ухил водної поверхні

Hydraulic model of a run-up process in the mouth area of a river. Plishin V.

The hydraulic model of the run-up phenomenon in the mouth area of a river is suggested in the research which makes it possible to get over the difficulty related to the "zero speed surface" and to consider delevelling and water surface slopes in a mouth area in the course of a three-phase run-up process.

Keywords: hydraulic model, run-up process, phases, delevelling, water surface