

В. В. Брук, канд. техн. наук;
(УКРНИИЭП, г. Харьков)

Ю. А. Гычка, студент
(ХАИ, г. Харьков)

УЧЕТ ВАРИАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ПРИ РАСЧЕТЕ КРАТНОСТИ РАЗБАВЛЕНИЯ ВОЗВРАТНЫХ ВОД

Исследована полученная ранее табличная зависимость коэффициента вертикальной турбулентной диффузии от скорости приводного ветра и глубины моря. Показано, что используемая в настоящее время для аппроксимации данной зависимости функция в виде неполного полинома 3-й степени неприменима в случае малых скоростей приводного ветра (данный случай представляет наибольший практический интерес с точки зрения оценки влияния сброса возвратных вод, так как соответствует минимальной кратности разбавления). Предложена новая формула для оценки вариаций коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в виде нелинейной зависимости, которая имеет вид экспоненциальной функции, асимметрично убывающей по мере отклонения глубины моря от величины, соответствующей максимуму коэффициента вертикальной турбулентной диффузии при заданной скорости ветра. Предложенная функция характеризуется более низкими значениями дисперсии ошибок и максимального абсолютного отклонения от табличных значений, а также высоким коэффициентом детерминации.

Ключевые слова: предельно допустимый сброс, возвратные воды, кратность разбавления, турбулентная диффузия, приводной ветер, аппроксимация, дисперсия ошибок, коэффициент детерминации.

Брук В. В., Гычка Ю. О. УРАХУВАННЯ ВАРІАЦІЙ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ТУРБУЛЕНТНОЇ ДИФУЗІЇ ПРИ РОЗРАХУНКАХ КРАТНОСТІ РОЗБАВЛЕННЯ ЗВОРОТНИХ ВОД

При розробленні норм гранично допустимого скидання (ГДС) речовин зі зворотними водами в моря для розрахунку кратності розбавлення зворотних вод необхідна оцінка коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії (D_V). У чинній інструкції з розроблення ГДС для розрахунків D_V при різних значеннях швидкості приводного вітру та глибини моря використовується функція

апроксимації у вигляді неповного кубічного полінома. Однак, застосування цієї функції неможливо у випадку малих швидкостей приводного вітру (даний випадок представляє найбільший практичний інтерес із погляду оцінки впливу скидання зворотних вод, тому що відповідає мінімальній кратності розбавлення). Мета роботи – удосконалення формули для оцінки коефіцієнтів вертикальної турбулентної дифузії.

З цією метою була досліджена таблична залежність коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії від швидкості приводного вітру й глибини моря, що була отримана раніше. Для апроксимації табличної залежності були розглянуті різні варіанти нелінійних функцій, для яких можлива лінеаризація. Параметри лінеаризації оцінювалися базуючись на методі найменших квадратів. Вибір відповідної функції апроксимації здійснювалася за допомогою коефіцієнта детермінації. За результатами досліджень була запропонована нова формула для оцінки варіацій коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії у вигляді нелінійної залежності, що при заданій швидкості вітру має вигляд експонентної функції, що асиметрично убуває в міру відхилення глибини моря від величини, що відповідає максимуму коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії при заданій швидкості вітру.

Отримана функція характеризується більш низькими значеннями дисперсії помилок і максимального абсолютного відхилення від табличних значень, а також високим коефіцієнтом детермінації. Запропонований алгоритм оцінки коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії може бути використаний для розрахунку кратності розбавлення зворотних вод при розробці проектів ГДС.

Ключові слова: *гранично допустимий скид, зворотні води, кратність розбавлення, турбулентна дифузія, приводний вітер, апроксимація, дисперсія помилок, коефіцієнт детермінації.*

Вступ

Для оценки влияния сбросов возвратных вод на качество морских вод [1, 2], а также для расчетов предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в море [3], необходимо рассчитывать кратность разбавления возвратных вод морскими водами в контрольном створе. Величина кратности основного разбавления существенно зависит от коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии [4], причем для морей значения коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии могут значительно различаться вследствие вертикальной стратификации морских вод.

Для корректной оценки кратности разбавления необходимо учитывать возможные вариации коэффициентов турбулентной диффузии при изменении скорости приводного ветра и глубины моря в районе выпуска. Однако применение для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии формулы, которая рекомендуется в действующей инструкции по расчету ПДС (см. [3]), не всегда представляется возможным. Цель данной работы усовершенствовать формулу для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии таким образом, чтобы она была применимой при малых скоростях приводного ветра в широком диапазоне глубин моря.

Основными факторами, влияющими на величину среднего коэффициента вертикальной турбулентной диффузии моря D_B в районе сброса возвратных вод, являются скорость приводного ветра V и средняя глубина моря H в районе сброса. В методике по расчету ПДС, которая действовала до 1994 г. [5], для сбросов возвратных вод в море вариации коэффициента вертикальной турбулентной диффузии при изменениях величин V и H не учитывались; величина D_B считалась постоянной и принималась согласно [6] равной $5 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Зависимость коэффициента вертикальной турбулентной диффузии от данных факторов исследована в [7-8] на основе численного решения системы дифференциальных уравнений в частных производных. В [8] получена формула аппроксимации для оценки величины D_B в виде неполного полинома 3-й степени:

$$D_B = c_0 + c_1V + c_2H + c_3V^2 + c_4H^2 + c_5VH + c_6V^2H + c_7VH^2, \quad (1)$$

где c_i – постоянные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1 согласно [3].

Таблица 1 – Значения коэффициентов c_i в формуле для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии

i	Коэффициенты c_i	
	$V \leq 6$ м/с	$V > 6$ м/с
0	$5,994 \cdot 10^{-4}$	$4,430 \cdot 10^{-2}$
1	$5,347 \cdot 10^{-4}$	$-1,029 \cdot 10^{-2}$
2	$-3,681 \cdot 10^{-4}$	$1,296 \cdot 10^{-4}$
3	$-1,469 \cdot 10^{-4}$	$5,905 \cdot 10^{-4}$
4	$5,669 \cdot 10^{-6}$	$-3,024 \cdot 10^{-4}$
5	$1,426 \cdot 10^{-4}$	$1,608 \cdot 10^{-4}$
6	$2,276 \cdot 10^{-6}$	$-1,160 \cdot 10^{-6}$
7	$-2,401 \cdot 10^{-6}$	$3,057 \cdot 10^{-6}$

Однако, опыт расчета ПДС для различных сбросов возвратных вод в море показывает, что применение формулы (1) в ряде случаев приводит к отрицательным значениям коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии. На рис. 1 представлена двумерная диаграмма значений коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии, рассчитанных по формуле (1) для различных значений величин V и H .

Как видно из представленной диаграммы, для малых скоростей приводного ветра ($V < 1,5$ м/с) формула (1) в широком диапазоне глубин моря приводит к отрицательным значениям величин D_B

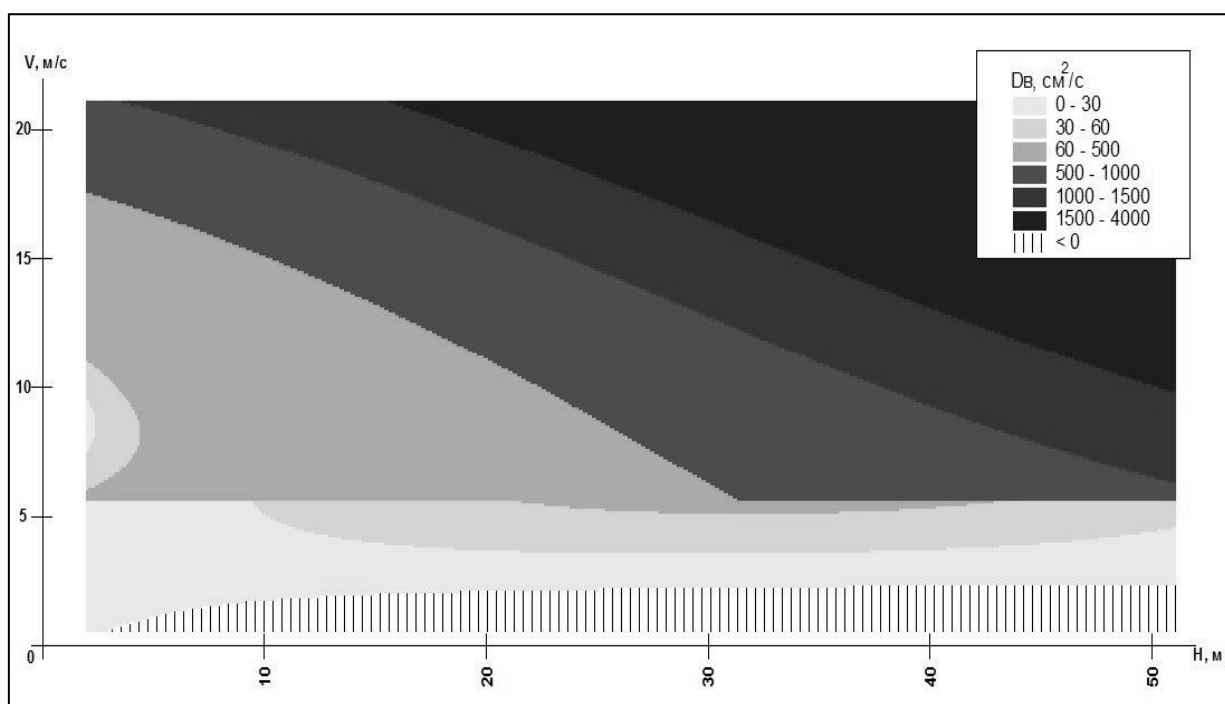


Рисунок 1 – Коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии (D_B , cm^2/c), рассчитанные по формуле (1) для различных скоростей ветра (V) и глубин (H)

Отметим, что случай малых скоростей приводного ветра представляет наибольший практический интерес, так как соответствует наихудшей с точки зрения загрязнения моря ситуации (наименьшая кратность разбавления). В этой связи возникает необходимость модификации формулы для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии. Рассмотрим табличные зависимости $D_B(V, H)$, полученные в [7] (табл. 2) и в [8] (табл. 3).

Как видно из представленных в таблицах 2-3 данных, функция при постоянных значениях глубины моря является монотонно возрастающей функцией от скорости ветра при всех рассматриваемых значениях глубин.

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии (D_B , см²/с) для значений глубины моря $H=5-400$ м и скорости ветра $V=5-30$ м/с

H, м	V, м/с					
	5	10	15	20	25	30
5	12	49	191	600	1375	2588
10	24	64	182	562	1425	2903
25	49	142	253	507	1211	2765
50	35	255	461	730	1233	2367
75	24	303	639	1005	1530	2483
100	18	298	761	1257	1855	2799
200	9	151	706	1665	2845	4171
300	5	100	474	1447	2307	4796
400	4	74	356	1095	2553	4625

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии (D_B , см²/с) для значений глубины моря $H=5-50$ м и скорости ветра $V=2,5-20$ м/с

H, м	V, м/с							
	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0
5	6,0	12,4	23,3	48,7	96,3	190,9	353,9	599,9
10	11,0	23,6	38,5	64,2	104,8	182,3	324,5	562,4
15	10,1	34,3	56,9	87,7	125,4	190,9	310,9	521,3
20	8,1	43,0	74,8	114,7	156,1	216,6	319,8	501,1
25	6,7	49,1	91,1	142,0	190,3	253,0	347,9	507,3
30	5,7	53,4	105,3	168,3	225,3	293,8	387,9	534,0
35	5,0	47,5	117,0	193,0	259,8	335,7	433,9	574,7
40	4,3	42,3	126,0	215,9	293,4	377,9	481,9	623,8
45	4,0	39,3	132,1	236,6	325,5	419,8	530,6	676,2
50	3,6	34,7	135,5	254,9	355,8	460,7	579,8	730,1

При постоянных значениях скорости ветра функция $D_B(V, H)$ имеет локальный максимум D_m , причем глубина, при которой достигается данный максимум H_m , возрастает с увеличением скорости приводного ветра. Было установлено, что регрессионная зависимость $H_m(V)$ хорошо аппроксимируется однородным квадратичным полиномом (рис. 2):

$$H_m = 5,667 \cdot V + 0,136 \cdot V^2. \quad (2)$$

Коэффициент детерминации составляет $B = 0,969$. Максимальная (при заданной скорости ветра) величина коэффициента вертикальной турбулентной диффузии также возрастает с увеличением скорости ветра. Регрессионная зависимость $D_m(V)$ хорошо аппроксимируется степенной функцией (рис.3):

$$D_m = 1,057 \cdot V^{2,441}. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации составляет $B = 0,999$.

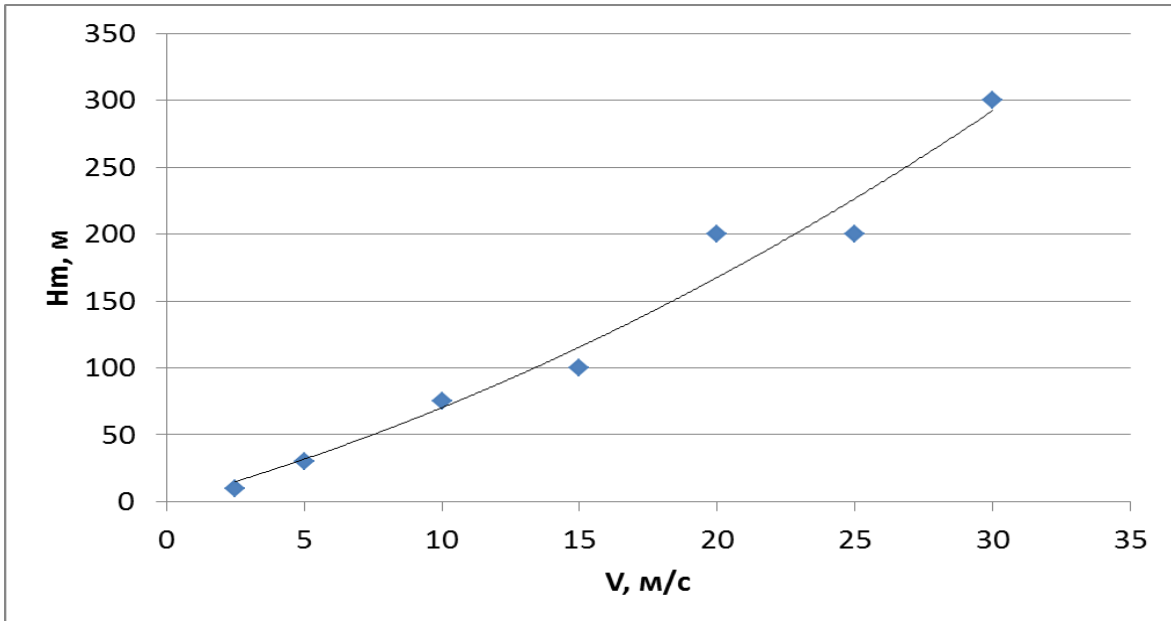


Рисунок 2 – Зависимость глубины моря, при которой наблюдается максимум среднего коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (H_m), от скорости ветра (V)

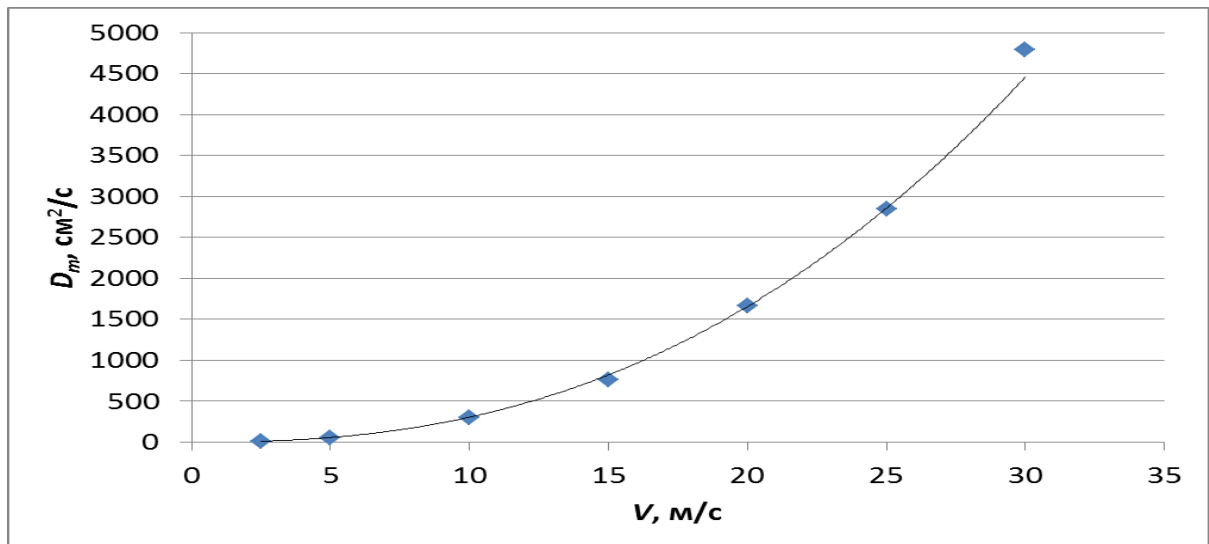


Рисунок 3 – Зависимость максимального значения среднего коэффициента вертикальной турбулентной диффузии (D_m), от скорости ветра (V)

Отметим, что при использовании для расчетов величины D_B формулы (1) зависимости $D_B(H)$ при постоянных значениях V представляют собой квадратичные полиномы. При определенных значениях коэффициентов c_i такие зависимости могут иметь локальные максимумы. Однако, в случае, когда функция $D_B(H)$ имеет вид квадратичного полинома, между величинами

D_B и $(H_m - H)^2$ должна наблюдаться линейная зависимость. Вместе с тем, графический анализ функций $D_B = f((H_m - H)^2)$ при различных значениях V показывает, что данные функции значительно отклоняются от линейных (рис. 4). В связи с этим были исследованы возможности аппроксимации табличной зависимости $D_B(V, H)$ различными нелинейными функциями, отличными от полиномиальной функции и допускающими линеаризацию. Было установлено, что при условии $H \leq H_m$ зависимости логарифма отношения $\frac{D_m}{D_B}$ от квадрата отклонения от величины H_m при различных значениях V очень хорошо описываются однородными линейными функциями (рис. 5).

$$\ln\left(\frac{D_m}{D_B}\right) = \alpha \cdot (H_m - H)^2. \quad (4)$$

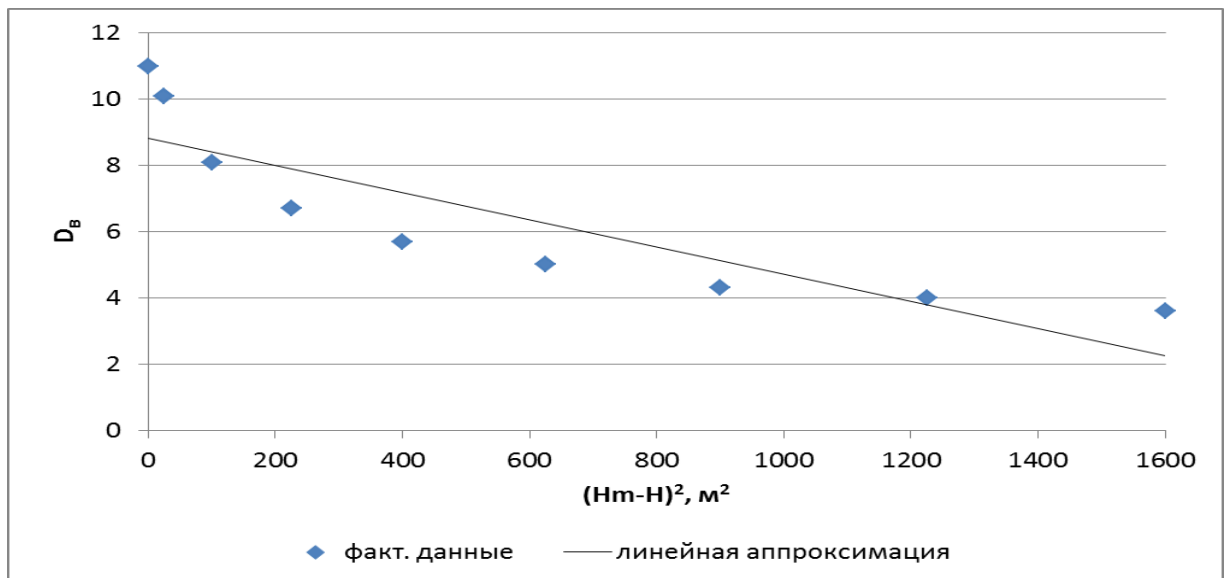


Рисунок 4 – Зависимость величины $(D_m - D_B)$ от величины $(H - H_m)^2$ при скорости приводного ветра $V = 2,5$ м/с.

При условии $H \geq H_m$ очень близки к линейным однородным функциям зависимости логарифма отношения $\frac{D_m}{D_B}$ вида от модуля отклонения от величины H_m (рис. 6):

$$\ln\left(\frac{D_m}{D_B}\right) = \beta \cdot (H - H_m). \quad (5)$$

На рис. 5-6 приведены зависимости для скорости приводного ветра $V = 5$ м/с. Указанные зависимости построены на основе данных, приведенных в табл. 2-3. Аналогичные зависимости наблюдаются и для других значений

скорости приводного ветра. Коэффициенты α и β в (4, 5) также являются функциями от скорости ветра V . Анализ графиков зависимостей $D_B(H)$ при различных значениях V позволил установить, что регрессионные зависимости $\alpha(V)$ и $\beta(V)$ хорошо описываются убывающими степенными функциями:

$$\alpha(V) = 0,13 \cdot V^{-2,53}; \quad \beta(V) = 0,14 \cdot V^{-1,43} \quad (6)$$

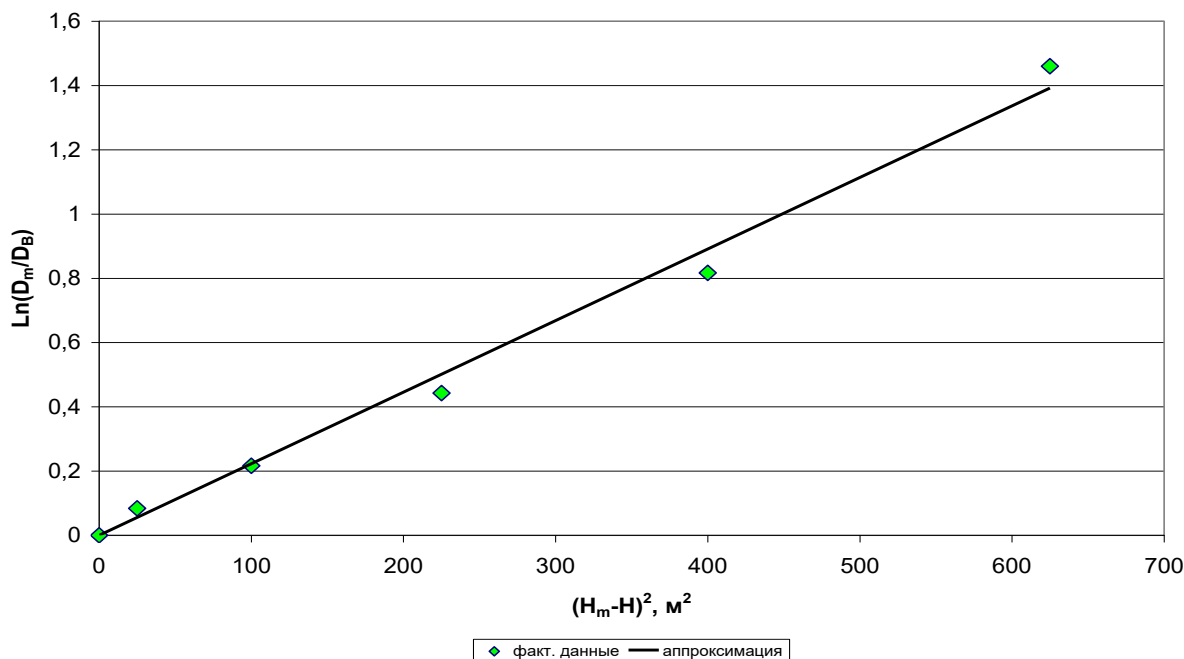


Рисунок 5 – Зависимость величины (D_m / D_B) от величины $(H - H_m)^2$ при скорости приводного ветра $V = 5$ м/с и глубине моря $H \leq H_m$.

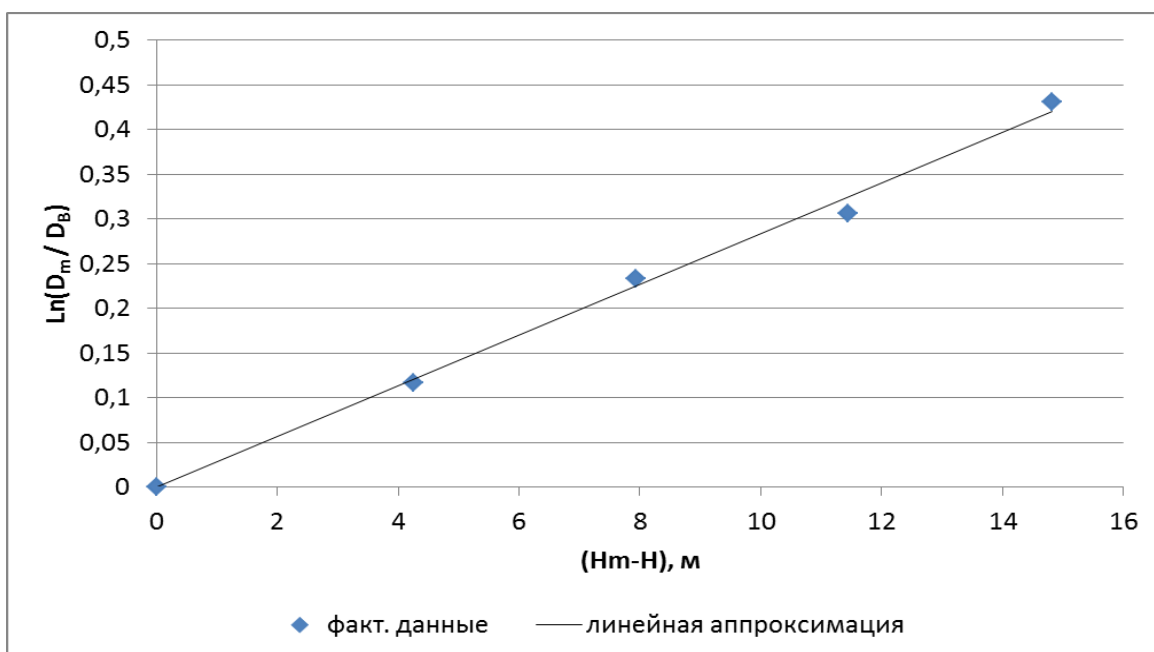


Рисунок 6 – Зависимость величины (D_m / D_B) от величины $(H - H_m)$ при скорости приводного ветра $V = 5$ м/с и глубине моря $H \geq H_m$.

Это позволяет сделать вывод о возможности аппроксимации зависимости $D_B(V, H)$ при постоянных значениях V экспоненциальной функцией, асимметрично убывающей по мере отклонения глубины H от значения H_m :

$$D_B(V, H) = \begin{cases} D_m \cdot \exp(-\alpha \cdot (H_m - H)^2), & \text{при } H < H_m \\ D_m \cdot \exp(-\beta \cdot (H_m - H)), & \text{при } H > H_m \end{cases}, \quad (7)$$

где величины H_m и D_m зависят от скорости ветра V согласно формулам (2, 3), а коэффициенты α и β согласно формулам (6). В отличие от формулы (1) формула (7) не приводит к отрицательным значениям коэффициента D_B . Количество параметров регрессии в функции (7) так же, как и для функции (1), равно 8. Однако, среднее отклонение значений коэффициента вертикальной турбулентной диффузии, рассчитанных по формуле (7), от табличных значений составляет $\Delta_{cp}(D_B) = 28,1 \text{ см}^2/\text{с}$, что значительно меньше среднего отклонения для значений, рассчитанных по формуле (1): $\Delta_{cp}(D_B) = 155,1$. Коэффициент детерминации для регрессионной функции (7) составляет $B = 0,9$. В то же время коэффициент детерминации для функции (1) оценить невозможно, поскольку дисперсия ошибок для данной функции превышает дисперсию величины D_B .

Выводы

1. Используемая в действующей инструкции по расчету ПДС формула для оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии при расчете кратности разбавления возвратных вод морскими водами неприменима при малых скоростях приводного ветра ($V < 1.5 \text{ м/с}$).

2. Представляется целесообразным для учета вариации коэффициента вертикальной турбулентной диффузии при изменениях глубины моря и скорости приводного ветра использовать предложенную нелинейную зависимость, имеющую вид экспоненциальной функции, асимметрично убывающей по мере отклонения глубины моря от значения, соответствующего максимальному для данной скорости ветра значению коэффициента вертикальной турбулентной диффузии.

3. Преимущества предложенной нелинейной зависимости заключаются в том, что она не приводит к отрицательным значениям величины D_B на всем диапазоне глубин и скоростей ветра; кроме того, она характеризуется более низкими значениями дисперсии ошибок и среднего модуля отклонения расчетных значений, а также высоким коэффициентом детерминации ($B = 0,9$).

Литература

1. Utkina K., Kresin V., Brook V., Lisnyak A. Integrated criteria for ranking Black Sea land-based point pollution sources // *Folia geographica*. Volume 59, 2017, No. 2. P.35-49.
2. Utkina K., Kresin V., Brook V., Iakovleva N. The Black Sea hot spot methodology: general overview and UA results // *Ekologichna bezpeka*. Kremenchuk: KrNU, 2016. – Vipusk №2/2016(22). P.43-50.
3. Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами / УкрНЦОВ. – Харків, 1994. – 79 с.
4. Баранник В. А., Кресин В. С. Расчет локального влияния сосредоточенного выпуска сточных вод на качество воды водоема. // *Водоохранные комплексы речных бассейнов: Сб. научн. тр.* – Харьков: ВНИИВО, 1985. – С. 101-106.
5. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами / ВНИИВО. Харьков, 1990. 113 с.
6. Цухтяр Л. Д., Осипов Ю. С. Турбулентные характеристики прибрежной зоны моря // *Вопросы гидрологии и гидрохимии южных морей: Труды ГОИН, вып. 158.* - Л.: Гидрометеиздат, 1981. - С. 35-41.
7. Тарнопольский А. Г. Вертикальная структура неглубокого турбулентного моря // *Тр. ГОИН.* 1991. Вып. 202. С. 99-109.
8. Тарнопольский А. Г. Способ учета циркуляционно-диффузионных процессов в методике расчета предельно допустимых сбросов веществ со сточными водами в прибрежную зону моря // *Проблемы охраны вод. Сб. науч. тр. / УкрНЦОВ.* Харьков. 1993. Вып. 1, 2. С. 79-89.

UDC 551.465.15:628:394

V. V. Brook, PhD (engineering), lead researcher,

USRIEP, Kharkov,

Y. A. Gychka, student,

KhAI, Kharkov

TAKING INTO ACCOUNT VARIATIONS OF VERTICAL TURBULENT DIFFUSION FOR CALCULATION OF THE RECIPROCAL DILUTION OF WASTEWATER

For correct calculation of reciprocal dilution of wastewater during discharging into a sea it is necessary to take into account the variations of the coefficient of vertical turbulent diffusion (D_v) with changing the near-water wind velocity (V) and the depth of the sea (H). The influence of these factors on a

vertical turbulent diffusion is expressing by approximating formula in the form of reduced cubic polynomial which has 8 parameters. But the use of this formula is limited to near-water wind velocities $V \geq 1.5$ m/s. The purpose of this article is to modify the approximating formula for give a possibility to use it for smaller wind velocities values.

With this purpose the possibility of approximation of the tabular function $D_v(V, H)$ by different nonlinear functions has been investigated. For investigation the linearization of functions and the estimation of linearization function parameters by means of least squares method have being used. The choice of the appropriate approximation function has being realized by means of coefficient of determination. It has been established that the appropriate approximating function has a form of exponential curve which asymmetrically decreases during deviation H from the value H_m that correspond to the D_m – maximum of D_v for constant V . It is expressed by following formulas: $D_v(V, H) = D_m \cdot \text{Exp}(-\alpha \cdot (H_m - H)^2)$ for $H \leq H_m$ and $D_v(V, H) = D_m \cdot \text{Exp}(-\beta \cdot (H_m - H))$ for $H \geq H_m$, where D_m , H_m , α and β are depended on V . It has been established that functional dependence $H_m(V)$ has the appearance of homogeneous square polynomial and function dependences $D_m(V)$, $\alpha(V)$, $\beta(V)$ have the appearance of power functions.

The new approximating formula for function depending $D_v(V, H)$ has 8 parameters too, but it is characterized by smaller error variance and high coefficient of determination value. After giving more accurate values of parameters the proposed approximating formula can be used for calculations of a reciprocal dilution during estimation of impacts of wastewater discharge on a sea or calculations of emission limit values for point wastewater discharges.

Key words: emission limit value, wastewater, reciprocal dilution, turbulent diffusion, near-water wind, approximation, error variance, coefficient of determination.

References

1. Utkina K., Kresin V., Brook V., Lisnyak A. *Integrated criteria for ranking Black Sea land-based point pollution sources // Folia geographica. Volume 59, 2017, No. 2. P.35-49.*
2. Utkina K., Kresin V., Brook V., Iakovleva N. *The Black Sea hot spot methodology: general overview and UA results // Ekologichna bezpeka. Kremenchuk: KrNU, 2016. – Vipusk #2/2016(22). P.43-50.*
3. *Instrukciya pro poryadok rozrobky ta zatverdzhennya granychno dopustymykh skydiv (GDS) rechovyn u vodni ob'yekty iz zvorotnymy vodamy / UkrNCzOV. – Kharkiv, 1994. – 79 p.*

4. Barannik V. A., Kresin V. S. *Raschet lokal'nogo vlijanija sosredotochennogo vypuska stochnyh vod na kachestvo vody vodoema. // Vodoohrannye kompleksy rechnyh bassejnov: Sb. nauchn. tr. – Kharkov: VNIIVO, 1985. – P. 101-106.*
5. *Metodika rascheta predel'no dopustimyh sbrosov (PDS) veshhestv v vodnye ob'ekty so stochnymi vodami / VNIIVO. Kharkov, 1990. 113 p.*
6. Cuhtjar L. D., Osipov Ju. S. *Turbulentnye harakteristiki pribrezhnoj zony morja // Voprosy gidrologii i gidrohimii juzhnyh morej: Trudy GOIN, vyp. 158. - L.: Gidrometeoizdat, 1981. - P. 35-41.*
7. Tarnopol'skij A. G. *Vertikal'naja struktura neglubokogo turbulentnogo morja // Tr. GOIN. 1991. Vyp. 202. P. 99-109.*
8. Tarnopol'skij A. G. *Sposob ucheta cirkuljacionno-diffuzionnyh processov v metodike rascheta predel'no dopustimyh sbrosov veshhestv so stochnymi vodami v pribrezhnuju zonu morja // Problemy ohrany vod. Sb. nauch. tr. / UkrNCzOV. Kharkov. 1993. Vyp. 1, 2. P. 79-89.*

© Брук В. В., Гычка Ю. А., 2018

phone: +380577021594, e-mail: morlab@ukr.net