

УДК 626.82

С. М. Васильев, Ю. Е. Домашенко, М. А. Ляшков

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН РАЗБАВЛЕНИЯ ПРИ ПОВТОРНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Целью работы является обоснование протяженности зон разбавления при повторной запитке сточными водами каналов оросительных систем. Актуальность повторного использования сточных вод на оросительных системах Ростовской области заключается в том, что заиленность чаши Цимлянского водохранилища и высокая транспортная нагрузка на р. Дон не позволяет гарантированно в течение поливного сезона осуществлять в необходимых объемах забор поливной воды в сеть оросительных каналов. В то же время большие объемы технологических сбросов и коллекторно-дренажных вод непроизводительно сбрасываются в водоприемники. В процессе анализа полученных решений выяснено, что неоднородность поля концентрации загрязняющих веществ по вертикали нужно учитывать только на небольшом участке ниже точки поступления стока. Определение длины участка поля концентрации в вертикальном направлении не играет ключевой роли при решении поставленной задачи. Поэтому в дальнейшем поле концентрации следует рассматривать как двумерное. Существующие в оросительных каналах потоки имеют слоистую кинематическую структуру, характерной чертой которой является взаимодействие потока и русла. Под воздействием движущихся масс русло канала со временем деформируется, и возникают разнообразные морфологические образования, которые оказывают действие на турбулентность потока и структуру скоростного поля. При наличии в пруду-накопителе различных застойных зон многоуровненности потока влияют на смешение и разбавление возможных загрязнителей. Дано обоснование для определения коэффициента дисперсии и оценки его зависимости от поля скоростей. Расстояние до створа полного перемешивания рекомендуется определять с учетом полученных эмпирических коэффициентов турбулентной дисперсии. Результаты расчетов могут продемонстрировать удовлетворительное совпадение с натурными данными, если входящие в них эмпирические коэффициенты уточнить путем проведения предварительных экспериментальных исследований на каждом рассматриваемом объекте.

Ключевые слова: сточные воды, оросительная система, зона разбавления, загрязняющие вещества, турбулентная дисперсия.

S. M. Vasilyev, Yu. Ye. Domashenko, M. A. Lyashkov

Russian Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

DILUTION ZONES DETERMINATION BY REUSE OF WASTEWATER ON IRRIGATION SYSTEMS

The aim of study is the justification of the dilution zones extent by waste water re-filling of irrigation channels. The urgency of wastewater reuse on irrigation systems in Rostov region lies in the fact that silting basin of Tsimlyansk reservoir and the high traffic load on the river Don doesn't allow reliable irrigation water intake in the irrigation canals network during the irrigation season as needed. At the same time a large amount of process vents and collec-

tor-drainage water is discharged into the intakes inefficiently. During the analysis of the solutions obtained it's been found out that the field non-uniformity of the contaminants' concentration vertically should be considered only on a small area below the point of effluent intake. Determination of the section length of the concentration pattern vertically does not play a key role in problem solving. Therefore, in the further concentration pattern should be considered as two-dimensional. The existing flows in irrigation canals have a layered kinematic structure, the characteristic feature of which is the interaction between a flow and a bed. Under the influence of moving masses, canal bed eventually becomes deformed and various morphological formations which affect the flow turbulence and the velocity field structure appear. With different stagnant areas in storage pond the flow's multilevels affect the mixing and dilution of possible contaminants. The substantiation for the determination of the dispersion coefficient and assessment of its dependence on the velocity field is done. It is recommended to determine the distance to the complete mixing cross section by taking into account the turbulent dispersion empirical coefficients. The calculation data can show a satisfactory agreement with the field data, if the included empirical coefficients are clarified through preliminary experimental research on every object under consideration.

Keywords: waste water, irrigation system, dilution zone, contaminants, turbulent dispersion.

Введение. Процесс орошения связан с образованием сточных вод (технологические сбросы, коллекторно-дренажный сток и др.). При повторном использовании таких вод на оросительных системах они могут оказывать существенное влияние на качество поливной воды в каналах и прудах-накопителях.

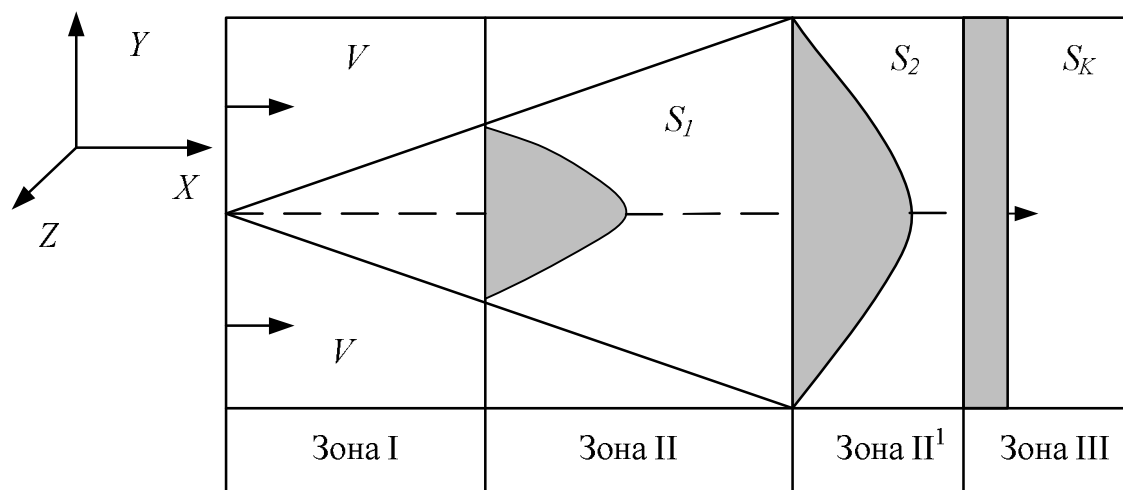
Для описания процессов, определяющих качество воды в каналах и прудах-накопителях, необходимо их моделирование. В практике прогнозирования используют преимущественно детерминистические модели, представленные в виде дифференциального уравнения турбулентной диффузии. Они дают возможность рассчитать изменение концентраций загрязняющих веществ на любом расстоянии от точки повторного забора воды, определить зону загрязнения и влияние формы выпусков на процесс смешения и разбавления сточных вод с поливной водой канала или пруда-накопителя [1–4].

Целью работы является обоснование протяженности зон разбавления при повторной запитке сточными водами каналов оросительных систем.

Материалы и методы. Указан метод расчета полей концентраций, предложенный А. В. Караушевым [4]. Поступающая в водный поток струя

примеси вследствие процессов турбулентной диффузии постепенно расширяется, и на некотором расстоянии от источника примесь распространяется по всему сечению потока, полное перемешивание сточных вод с водой канала происходит на некотором расстоянии от места запитки. Этот факт положен нами в основу определения места расположения точек забора воды для полива при повторном использовании сточных вод.

Участок канала, на котором происходит разбавление, условно можно разделить на три зоны, границы которых требуют точек мониторинга (рисунок 1).



V – скорость течения, м/с; S – концентрация примесей в сточной воде для соответствующей зоны, мг/дм³

Рисунок 1 – Схема диффузии загрязнителей при повторном использовании воды

Интенсивность снижения и характер распределения концентраций примесей в пределах указанных зон различны.

Первая зона (зона I) располагается от створа выпуска до створа, где диффундируемая струя распространяется, не соприкасаясь с ограничивающими поток поверхностями. Формирование поля концентраций в зоне происходит по причине турбулентного переноса частиц примеси в потоке вихревыми образованиями.

Вторая зона (зона II и зона II¹) находится в пределах створа касания

диффундируемой струей дна или других поверхностей створа полного перемешивания.

Третья зона (зона III) характеризуется разбавлением до естественного фона.

Интенсивность снижения и характер распределения сточных вод в пределах рассматриваемых зон различны. Основное снижение максимальных концентраций происходит в зоне I, которая зависит от отношения глубины потока к условному диаметру выпуска и смешивающихся расходов водотока и расходов выпуска.

Результаты проведенных экспериментов выявили, что в пределах этой зоны в случае стационарного точечного выпуска примеси снижение максимальной концентрации S_{\max} по длине потока происходит примерно пропорционально: $x^{-\frac{3}{2}}$. Для построения зон качества воды используется уравнение турбулентной диффузии [5].

Классическое уравнение турбулентной диффузии имеет вид:

$$\frac{\delta S}{\delta t} + v_x \frac{\delta S}{\delta x} + v_y \frac{\delta S}{\delta y} + v_z \frac{\delta S}{\delta z} = D_x \frac{\delta^2 S}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 S}{\delta y^2} + D_z \frac{\delta^2 S}{\delta z^2} + F(x, y, z, t), \quad (1)$$

где $S(x, y, z, t)$ – концентрация примесей в стоке;

v_x, v_y, v_z – компоненты скорости течения в направлении соответствующих осей x, y, z , где ось x направлена вниз по течению, ось y – поперек, z – вертикально вверх;

D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной дисперсии в соответствующих направлениях;

F – функция источника, определяющая приток и отток загрязняющих веществ.

Уравнение турбулентной диффузии можно выразить в форме конечных разностей. Для этого случая дифференциалы $\delta x, \delta y, \delta z, \delta S$ заменяются конечными приращениями $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta S$. Далее вся расчетная об-

ласть делится плоскостями, параллельными координатным, на расчетные клетки (рисунок 2).

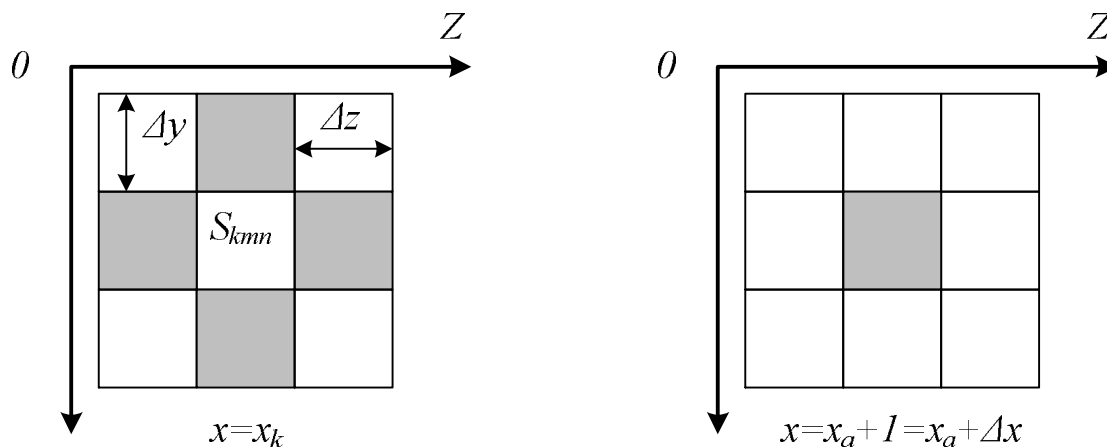


Рисунок 2 – Расчетные клетки для определения турбулентной диффузии

Расчетная зависимость для этого случая имеет вид:

$$S_{k+1,n,m} = \frac{1}{4} (S_{k,n+1,m} + S_{k,n-1,m} + S_{k,n,m+1} + S_{k,n,m-1}), \quad (2)$$

где k, n, m – индексы по соответствующим осям координат.

При этом должно выполняться условие:

$$\Delta x = \frac{V_{cp} \cdot \Delta z^2}{4D}, \quad (3)$$

где V_{cp} – средняя скорость потока, м/с;

D – коэффициент диффузии.

При расчете турбулентной диффузии рассматриваемую часть потока делят на клетки со сторонами Δx и Δz , получая сетку, на которую в начальном створе наносят общую площадь загрязненной струи и концентрацию загрязняющего вещества.

Результаты и обсуждение. Так, метод расчета полей концентраций, разработанный Г. А. Филькиным и Т. А. Кондюриной [6], основан на уравнении турбулентной диффузии вида:

$$\frac{\delta S}{\delta t} + v \frac{\delta S}{\delta x} = D_x \frac{\delta^2 S}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 S}{\delta y^2} + D_z \frac{\delta^2 S}{\delta z^2} + F(x, y, z, t), \quad (4)$$

Здесь ось x направлена вниз по течению воды в канале, ось y – поперек, ось z – вертикально вверх.

Начальным условием будет служить концентрация примесей в некотором фиксирующем створе. Лимитирующими условиями будут условия непроницаемости на границах потока:

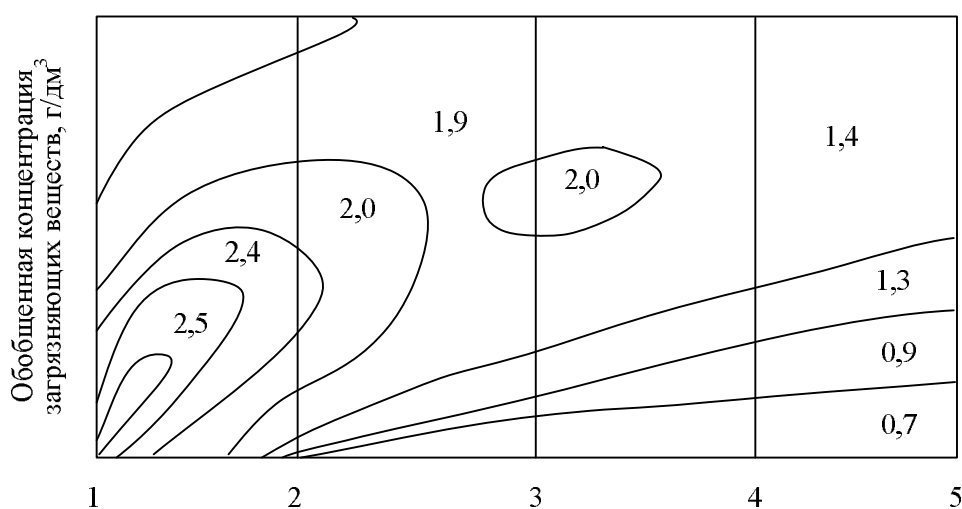
$$\frac{\delta S}{\delta n_0} = 0, \quad (5)$$

где n_0 – единичный фактор нормали к границе потока.

В случае стационарных стоков загрязняющих веществ уравнение принимает упрощенный вид:

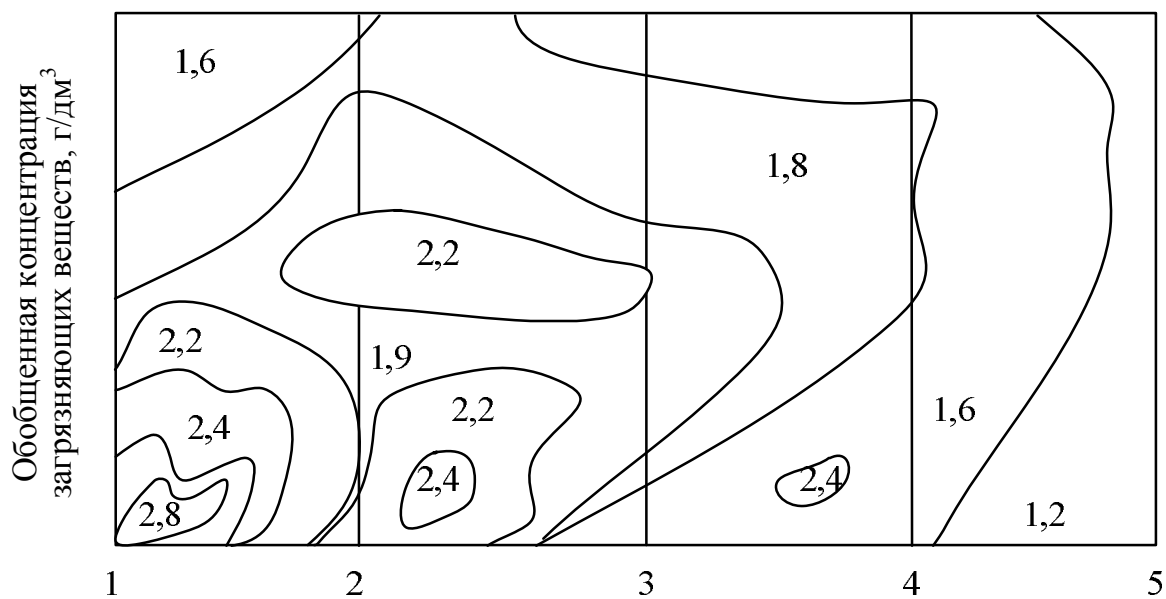
$$v \frac{\delta S}{\delta x} = D_x \frac{\delta^2 S}{\delta x^2} + D_y \frac{\delta^2 S}{\delta y^2} + D_z \frac{\delta^2 S}{\delta z^2}. \quad (6)$$

В процессе анализа полученных решений выяснено, что неоднородность поля концентрации загрязняющих веществ в вертикальном направлении нужно учитывать только на небольшом участке ниже точки поступления стока. Такое предположение подтвердилось полевыми наблюдениями и результатами химических анализов. Обобщенная динамика полей концентраций загрязняющих веществ представлена на рисунках 3–6.



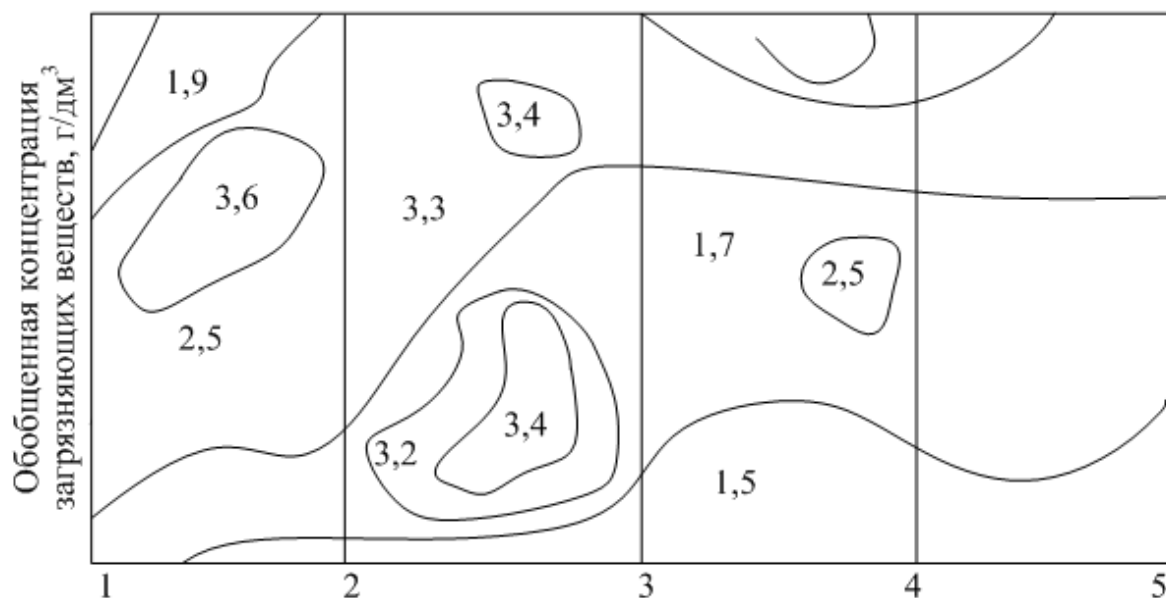
1, 2, 3, 4, 5 – створы наблюдений; расстояние между створами – 100 м

Рисунок 3 – Распределение концентраций веществ, поступающих при организованном стоке в канал



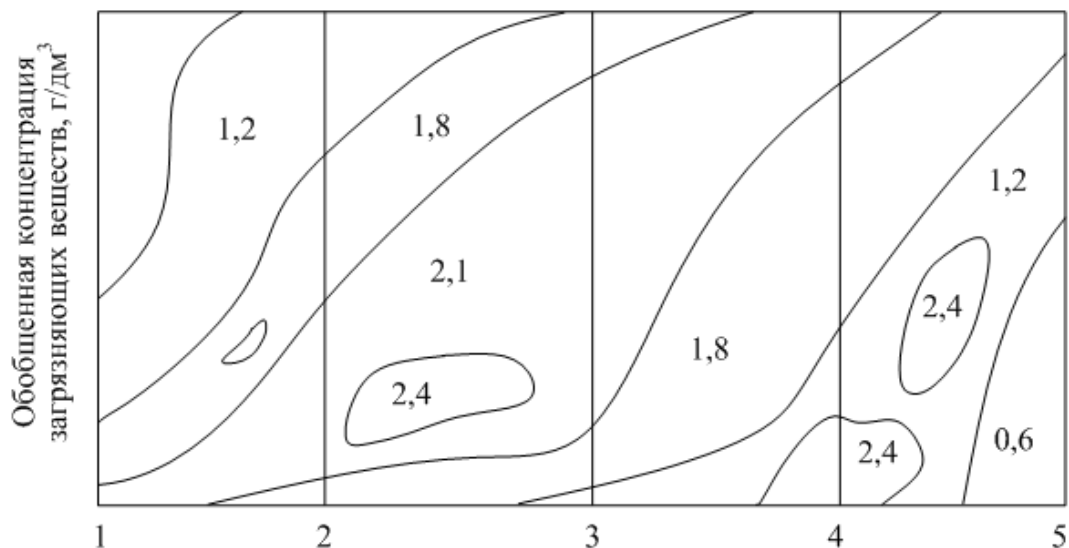
1, 2, 3, 4, 5 – створы наблюдений; расстояние между створами – 50 м

Рисунок 4 – Распределение концентраций веществ, поступающих при организованном стоке в канал



1, 2, 3, 4, 5 – створы наблюдений; расстояние между створами – 50 м

Рисунок 5 – Распределение концентраций веществ, поступающих при организованном береговом способе подачи стока в пруд-накопитель



1, 2, 3, 4, 5 – створы наблюдений; расстояние между створами – 100 м

Рисунок 6 – Распределение концентраций веществ, поступающих при организованном береговом способе подачи стока в пруд-накопитель

На основании результатов полевых наблюдений и представленной динамики, можно делать вывод о том, что процесс смешения воды в канале и пруду-накопителе с повторно используемыми сточными водами зависит от скоростей течения, соотношения расходов воды и поступающих сточных вод.

Определение длины участка поля концентрации в вертикальном направлении не играет ключевой роли при решении поставленной задачи, поэтому в дальнейшем поле концентрации можно считать двумерным, зависящим только от x и y .

Существующие в оросительных каналах потоки имеют слоистую кинематическую структуру, характерной чертой которой является взаимодействие потока и русла. Под воздействием движущихся масс русло канала со временем деформируется, и возникают разнообразные морфологические образования, которые оказывают действие на турбулентность потока и структуру скоростного поля. При наличии в пруду-накопителе различных застойных зон многоуровненности потока влияют на смешение и разбавление возможных загрязнителей.

Следует также отметить, что результаты расчетов могут продемонстрировать удовлетворительное совпадение с натурными данными, если входящие в них эмпирические коэффициенты уточнить путем проведения предварительных полевых изысканий на каждом рассматриваемом объекте. Анализируя существующие модели, можно прийти к выводу о том, что при практическом решении уравнений турбулентной диффузии основную трудность представляет расчет коэффициентов дисперсии.

Серьезного и достаточного обоснования для расчета коэффициента дисперсии и оценки зависимости его от поля скоростей в настоящий момент не существует, потому что он не является постоянным по всему течению и зависит от координат и времени. Большинство полученных зависимостей по результатам эмпирических исследований не учитывает анизотропность этого коэффициента, что приводит к расхождению данных расчетов с результатами натуральных измерений.

Определение коэффициента поперечной дисперсии на каналах производим с использованием уравнения турбулентной диффузии [6]:

$$Dy = \left(C \frac{B^2 V}{Ln} \right)^{1/n}, \quad (7)$$

где C – эмпирический коэффициент, который зависит от максимальной концентрации S_{\max} (превышение концентрации загрязнителя в водном растворе над ПДК дает значение S_{\max}) и фоновой концентрации загрязняющих веществ в водоеме или водотоке S_{\min} ;

Ln – расстояние между местом запитки и водовыделом;

n – число водовыделов.

Если соотношение $\left(\frac{S_{\min}}{S_{\max}} \right) < 0,33$, то значение коэффициента C определяем по формуле [7–10]:

$$C = -\frac{1}{4 \ln \frac{S_{\min}}{S_{\max}}} \quad (8)$$

Если соотношение $\left(\frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right) > 0,33$, то коэффициент C определяем по рисунку 7, на котором представлена зависимость C от $\left(\frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right)$ для изучаемых оросительных систем [7–10]. Расстояние от места поступления стоков до места водовыдела определим следующим образом:

$$Ln = (H^2 V) / KD_y, \quad (9)$$

где H – средняя глубина водоема на рассматриваемом участке, м;

K – корректирующий множитель.

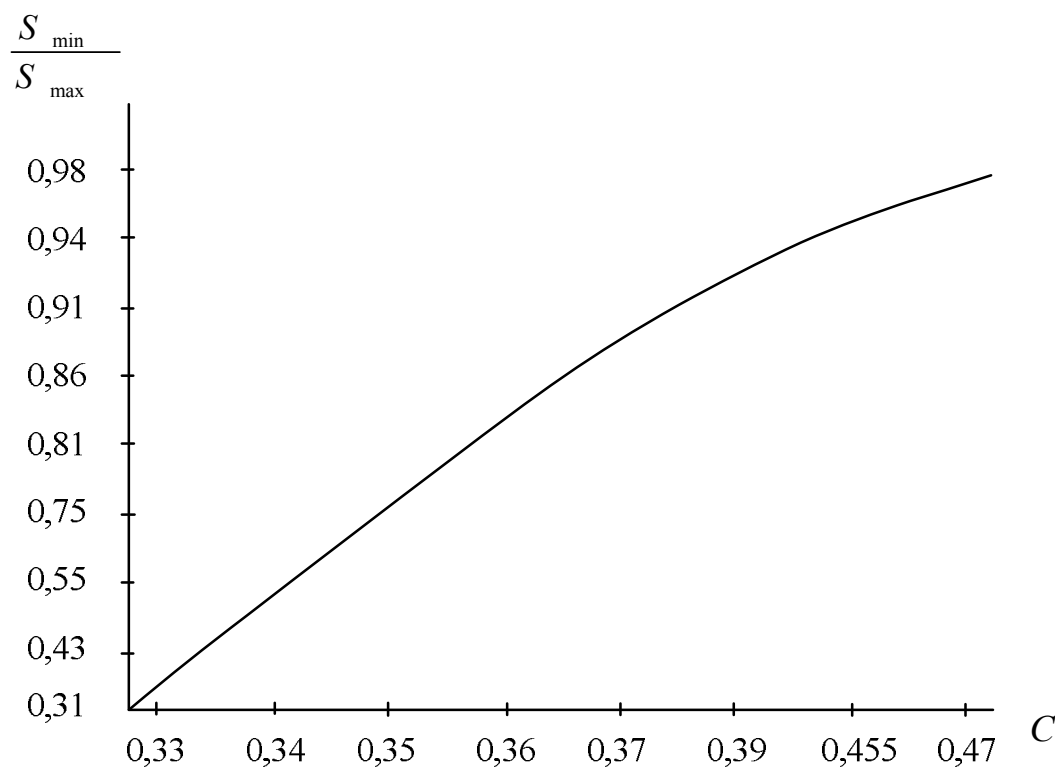


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента $C = f\left(\frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right)$

Определение зон разбавления при повторном использовании сточных вод на оросительных системах производится с учетом эмпирических коэффициентов C турбулентной дисперсии (таблица 1).

Таблица 1 – Определение числовых значений коэффициентов C

Коэффициент турбулентной дисперсии	Канал Бгр-7			Канал Бгр-8			Пруд-накопитель		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$D_y, (m^2/c) \times 10^2$ по существующей методике [1]	28,2	57,4	39,4	31,1	18,4	26,4	11,4	19,3	23,9
$D_y, (m^2/c) \times 10^2$ эксперимент	26,1	52,6	36,5	28,2	15,9	23,7	7,9	16,1	18,1
C	0,9250	0,9160	0,9260	0,9060	0,8640	0,8970	0,6920	0,8340	0,7573

Выводы

1 Использование поправочных эмпирических коэффициентов к аналитическим зависимостям на практике даст возможность получать достоверную информацию о загрязнителях за счет оптимального расположения точек водозабора при повторном использовании на оросительных системах сточных вод.

2 Определение длины участка поля концентрации в вертикальном направлении не играет существенной роли при решении поставленной задачи, поэтому в дальнейшем поле концентрации можно считать двумерным, зависящим только от x и y .

3 Определение зон разбавления при повторном использовании сточных вод на оросительных системах производится с учетом эмпирических коэффициентов C , значения которых получены на основании натурных исследований. Выявление границ этих областей и отслеживание динамики их изменения по предлагаемому уточненному способу позволит повысить качество получаемых данных.

Список использованных источников

- 1 Бесценная, М. А. Усовершенствование экспресс-метода расчета разбавления сточных вод в реках / М. А. Бесценная // Труды ГГИ, 1972. – 191 с.
- 2 Васильев, С. М. Прогнозирование поступления загрязняющих веществ с орошаемых земель / С. М. Васильев // Вопросы мелиорации: информ. бюл. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 2005. – № 7–8. – С. 59–66.
- 3 Караушев, А. В. Оценка и моделирование качества воды в водных объектах / А. В. Караушев, Б. Г. Скакальский // Проблемы современной гидрологии: сб. ст. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 57 с.

4 Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / под ред. А. В. Караушева. – Л.: Гидрометеиздат. – 175 с.

5 Руффель, Н. Н. Натурные исследования процессов смешения и разбавления сточных вод в реках / Н. Н. Руффель. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.

6 Филькин, Г. В. Распространение загрязняющих веществ при различных формах сброса / Г. В. Филькин, Т. А. Кондюрина // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, г. IV, Новочеркасск, 1996. – С. 34–37.

7 Иванов, А. Л. Проблемы и перспективы развития сельских территорий аридных зон России. Эколого-мелиоративные аспекты научно-производственного обеспечения АПК / сост. А. Л. Иванов [и др.]. – М.: Изд-во «Современные тетради», 2005. – С. 3–4.

8 Ионова, З. М. Мировой опыт применения водосберегающих технологий орошения / З. М. Ионова. – М., 2001. – 54 с.

9 Безднина, С. Я. Качество воды для орошения. Принципы и методы оценки / С. Я. Безднина. – М.: РОМА, 1997. – 185 с.

10 Кирейчева, Л. В. Концепция создания устойчивых мелиоративных ландшафтов / Л. В. Кирейчева // Вестник РАСХН, 1997. – № 5. – С. 51–55.

References

1 Bestsennaya M.A. 1972. *Uovershenstvovanie ekspres-metoda rascheta razbavleniya stochnykh vod v rekakh* [Improving rapid method for calculating the effluent dilution in rivers]. *Trudy GGI* [Proceedings of the GGI], 191 p. (In Russian).

2 Vasiliev S.M. 2005. *Prognozirovanie postupleniya zagryaznyayushchikh veshchestv s oroshaemykh zemel* [Forecasting of input of contaminants from irrigated lands]. *Voprosy Melioratsii: inform. byul.* [Issues of Land Reclamation: Inf. Bull.]. Moscow, CSTI “Meliovodinform” Publ., no. 7-8, pp. 59-66. (In Russian).

3 Karaushev A.V., Skakalskiy B.G. 1979. *Otsenka i modelirovanie kachestva vody v vodnykh obektakh* [Assessment and modeling of water quality in water bodies]. *Problemy sovremennoy gidrologii: sbornik statey* [Problems of modern hydrology: Coll. Sc. Articles]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 57 p. (In Russian).

4 Karaushev A.V. *Metodicheskie osnovy otsenki antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod* [Methodical bases of an estimation of anthropogenic impact on the quality of surface waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 175 p. (In Russian).

5 Ruffel N.N. 1969. *Naturnye issledovaniya protsessov smesheniya i razbavleniya stochnykh vod v rekakh* [Field investigations of the processes of mixing and dilution of sewage in rivers]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. (In Russian).

6 Fil'kin G.V., Kondyurina T.A. 1996. *Rasprostranenie zagryaznyayushchikh veshchestv pri razlichnykh formakh sbrosa* [Contaminants distribution in various forms of discharge]. *Sbornik statey Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of papers of All-Russian scientific-practical conference, IV]. Novocherkassk, pp. 34-37. (In Russian).

7 Ivanov A.L. 2005. *Problemy i perspektivy razvitiya selskokhozyaistvennykh territoriy aridnoy zony. Ekologo-meliorativnye aspekty nauchno-proizvodstvennogo obespecheniya APK* [Problems and prospects of development of rural territories of Russia arid zones. Ecological and reclamation aspects of scientific and industrial provision of agro-industrial complex]. Moscow, “Modern notebook” Publ., pp. 3-4. (In Russian).

8 Ionova Z.M. 2001. *Mirovoy opyt primeneniya vodosberegayushikh tekhnologiy orosheniya* [World experience of water-saving irrigation technologies application]. Moscow, 54 p. (In Russian).

9 Bezdina S.Ya. 1997. *Kachestvo vody dlya orosheniya. Printsipy i metody otsenki* [Quality of water for irrigation. Principles and methods of assessment]. Moscow, ROMA Publ., 185 p. (In Russian).

10 Kireycheva L.V. 1997. *Kontseptsiya sozdaniya ustoychivykh meliorativnykh landshaftov* [The concept of creating sustainable reclamation landscapes]. *Vestnik RASKHN* [Journal of Agricultural Sciences], no. 5, pp. 51-55. (In Russian).

Васильев Сергей Михайлович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: доцент

Должность: заместитель директора по науке

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Vasilyev Sergey Mikhaylovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Associate Professor

Position: Deputy Director of Science

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: rosniipm@yandex.ru

Домашенко Юлия Евгеньевна

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: начальник отдела

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: domachenko_u@list.ru

Domashenko Yuliya Yevgenyevna

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Head of the Department

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: domachenko_u@list.ru

Ляшков Максим Анатольевич

Должность: младший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: layshkov@mail.ru

Lyashkov Maxim Anatolevich

Position: Junior Researcher

Affiliation: Russian Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novochoerkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: layshkov@mail.ru