

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCES

УДК 621.39.7:519.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-71-77>

Поступило в редакцию 08.01.2026
Received 08.01.2026

Г. П. Бровка, И. Н. Дорожок

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь*

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИСПЕРСИИ И ЕЕ ВЛИЯНИЯ
НА КОНВЕКТИВНО-ДИФФУЗИОННЫЙ ПЕРЕНОС РАДИОАКТИВНЫХ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПРИРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ**

(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)

Аннотация. Представлены явные аналитические зависимости коэффициента гидродисперсии радионуклидов от скорости потока влаги и характеристик их сорбции при конвективно-диффузионном переносе в природных дисперсных средах. Эти зависимости получены на основании анализа асимптотического решения уравнения конвективно-диффузионного переноса радионуклидов с учетом неравновесного характера их сорбции и наличия молекулярной диффузии. Показано, что для коэффициента гидродисперсии радионуклидов характерна квадратичная зависимость от скорости потока влаги и обратно пропорциональная зависимость от коэффициента массообмена между радионуклидами, находящимися в поровом растворе и сорбированных твердой компонентой дисперсной среды. В деятельном слое территории, где происходят периодические изменения величины и направления скорости конвективного потока влаги, рекомендовано расчет процессов конвективно-диффузионного переноса радионуклидов проводить обязательно с учетом неравновесного характера их сорбции твердой компонентой. Установлено, что в деятельном слое основной вклад в перенос радионуклидов вносит гидродисперсия, определяемая среднеинтегральной величиной квадрата скорости конвективного потока влаги, и эффективная молекулярная диффузия. Это обуславливает сравнительно малую величину скорости переноса радионуклидов в деятельном слое в направлении водоносных горизонтов при отсутствии участков закрытого водосбора склонового стока.

Ключевые слова: конвективно-диффузионный перенос, радиоактивные загрязнения, гидродисперсия, молекулярная диффузия, сорбция, природные дисперсные среды

Для цитирования. Бровка, Г. П. Оценка параметров гидродисперсии и ее влияния на конвективно-диффузионный перенос радиоактивных загрязнений в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка, И. Н. Дорожок // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2026. – Т. 70, № 1. – С. 71–77. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-71-77>

Gennady P. Brovka, Inga N. Dorozhok

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus,
10, F. Skorina Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus*

**ESTIMATING PARAMETERS OF HYDRODISPERSION AND ITS IMPACT
ON CONVECTIVE-DIFFUSIVE TRANSFER OF RADIOACTIVE CONTAMINATION
IN NATURAL DISPERSIVE MEDIA**

(Communicated by Academician Vladimir F. Loginov)

Abstract. This article presents explicit analytical dependencies of the hydrodispersion coefficient of radionuclides on the moisture flow rate and the characteristics of their sorption during convective-diffusive transport in natural dispersed media. These dependencies are obtained based on the analysis of the asymptotic solution of the convective-diffusive transport equation for radionuclides, taking into account their non-equilibrium sorption and the presence of molecular diffusion. It has been shown that the coefficient of hydrodispersion of radionuclides has a quadratic dependence on the moisture flow rate and an inverse dependence on the mass transfer coefficient between radionuclides in the pore solution and those sorbed by the solid component of the dispersed medium. In the active layer of the territory, where there are periodic changes in the magnitude and direction of the convective moisture flow rate, it is recommended that the calculation of the convective-diffusive transfer of radionuclides be carried out with due consideration of the non-equilibrium nature of their sorption by the solid component.

It has been established that in the active layer, the main contribution to the transport of radionuclides is made by hydrodispersion, which is determined by the average integral value of the square of the convective moisture flow velocity, and effective molecular diffusion. This results in a relatively low rate of transport of radionuclides in the active layer in the direction of aquifers, in the absence of closed catchment areas of slope runoff.

Keywords: convective-diffusion transfer, radioactive contamination, hydrodispersion, molecular diffusion, sorption, natural dispersed media

For citation. Brovka G. P., Dorozhok I. N. Estimating parameters of hydrodispersion and its impact on convective-diffusive transfer of radioactive contamination in natural dispersive media. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2026, vol. 70, no. 1, pp. 71–77 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2026-70-1-71-77>

Введение. В настоящее время актуализируются проблемы повышения точности и достоверности прогноза распространения радиоактивных загрязнений в природно-территориальных комплексах с действующими и строящимися объектами ядерной энергетики Республики Беларусь. Одной из таких проблем является оценка параметров гидродисперсии, представляющей собой рассеяние фронта распространения радиоактивных загрязнений при конвективно-диффузионном их переносе в природных дисперсных средах. В настоящее время при оценке гидродисперсии сорбируемых водорастворимых соединений, к которым относятся и соединения радионуклидов, доминирует эмпирический подход, основанный на линейной зависимости коэффициента гидродисперсии от скорости конвективного потока влаги [1–6]. При этом в основном обращают внимание на факторы, обусловленные неоднородностями дисперсной среды на макро- и микроуровнях, которые практически не зависят от особенностей переносимых водорастворимых соединений. В большинстве случаев гидрогеологические изыскания ограничиваются определением гидродисперсии водоносных горизонтов с помощью отдельных водорастворимых соединений или нейтральных не сорбируемых меток. Затем эти результаты предлагают использовать при оценке переноса конкретных сорбируемых водорастворимых соединений без учета их сорбционных характеристик в отношении конкретной дисперсной среды. Это обуславливает несоответствие оценок гидродисперсии сорбируемых водорастворимых соединений их фактическим значениям. Недостатки такого подхода можно показать с помощью численных решений соответствующих классических задач конвективно-диффузионного переноса с учетом кинетики сорбции (задач динамики сорбции) [7; 8]. В пользу альтернативы такому подходу свидетельствуют полученные решения задач конвективно-диффузионного переноса водорастворимых сорбируемых соединений, в которых в явной аналитической форме показано влияние параметров сорбции водорастворимых соединений на их гидродисперсию [9–12].

Используемые методы оценки гидродисперсии. В лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем Института природопользования НАН Беларуси были получены асимптотические решения задач конвективно-диффузионного переноса с учетом постоянной скорости конвективного потока влаги и кинетики сорбции водорастворимых соединений при линейной изотерме сорбции. На первом этапе получено асимптотическое решение задачи конвективно-диффузионного переноса без учета коэффициента молекулярной диффузии [9], а затем решена аналогичная задача с учетом коэффициента молекулярной диффузии [12]. Анализ этих решений позволяет получить формулы, в явном виде представляющие зависимость коэффициента гидродисперсии от скорости конвективного потока, коэффициентов распределения и массообмена водорастворимых соединений. Асимптотическое решение с учетом конвективного переноса, неравновесной сорбции и молекулярной диффузии, а также параметры гидродисперсии имеют вид:

$$C1(X, \tau) = 0,5(C_{\text{вх}} - C_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{X - 0,5\Delta\xi_{gd} - \Delta\xi_{dm} - U\tau}{2\sqrt{D_S\tau}} \right),$$

$$C2(X, \tau) = 0,5K_d(C_{\text{вх}} - C_0) \operatorname{erfc} \left(\frac{X + 0,5\Delta\xi_{gd} - \Delta\xi_{dm} - U\tau}{2\sqrt{D_S\tau}} \right),$$

$$U = \frac{V}{(1 + K_d / W)},$$

$$\Delta\xi_{gd} = W \frac{V}{\alpha (1 + W / K_d)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\xi_{dm} &= D_{pr} / V, \\ D_{gd} &= \frac{V^2}{\alpha} \frac{K_d^2 W^2}{(K_d + W)^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$D_S = \frac{V^2}{\alpha} \frac{K_d^2 W^2}{(K_d + W)^3} + D_{pr} \frac{W}{(K_d + W)}, \quad (3)$$

где C_1 – массовая концентрация водорастворимого соединения, д. е. или удельная активность радионуклида в поровом растворе, Бк/кг; C_2 – массовая концентрация водорастворимого соединения, д. е. или удельная активность радионуклида в твердой фазе системы, Бк/кг; C_0 и $C_{вх}$ – соответственно исходная и входная концентрация водорастворимого соединения, д. е. или удельная активность радионуклида в поровом растворе, Бк/кг; D_{pr} – коэффициент диффузии водорастворимого соединения в поровом растворе, м²/с; D_S – коэффициент суммарной гидродисперсии водорастворимого соединения, м²/с; D_{gd} – коэффициент гидродисперсии водорастворимого соединения, м²/с; V – линейная скорость конвективного переноса влаги, м/с; U – линейная эффективная скорость конвективного переноса влаги, м/с; K_d – коэффициент распределения, характеризующий отношение концентраций водорастворимых соединений, связанных твердой фазой материала и находящихся в поровом растворе; α – коэффициент массообмена водорастворимого соединения твердая фаза материала – поровый раствор, с⁻¹; W – влагосодержание материала, кг/кг; $\Delta\xi_{gd}$ – параметр сдвига центра половинной концентрации за счет гидродисперсии, м; $\Delta\xi_{dm}$ – параметр сдвига центра половинной концентрации за счет молекулярной диффузии, м.

Полученное решение показывает, что средние относительные концентрации жидкой и твердой компонент радионуклидов сдвинуты относительно центра средней концентрации соответственно на величину $+0,5\Delta\xi_{gd}$ и $-0,5\Delta\xi_{gd}$, расчет абсолютного значения которой проводится по формуле (1). За счет молекулярной диффузии также происходит сдвиг на величину $\Delta\xi_{dm}$ в направлении потока влаги, одинаковую для жидкой и твердой компоненты.

Формула (2) выражает зависимость коэффициента гидродисперсии от скорости потока влаги, сорбционных характеристик и влажности. Коэффициент суммарной гидродисперсии D_S , определяющий рассеяние фронта концентрации, при этом выражается формулой (3). Первое слагаемое этой формулы соответствует коэффициенту гидродисперсии, а второе – эффективному коэффициенту молекулярной диффузии. Аддитивная величина этих коэффициентов определяет распределение водорастворимых соединений в области их рассеяния по зависимости, характерной диффузионным процессам.

Необходимо отметить, что для расчета эффективного коэффициента диффузии используется коэффициент диффузии водорастворимого соединения в поровом растворе D_{pr} , который зависит от соответствующего коэффициента диффузии водорастворимого соединения в поровом растворе и коммуникации водопроводящих путей дисперсной среды. Этот коэффициент D_{pr} удобно представить [11] в виде

$$D_{pr} = D_0 K_c,$$

где D_0 – коэффициент диффузии в объемном растворе; K_c – коэффициент коммуникации водопроводящих путей. Коэффициент коммуникации водопроводящих путей аналогичен коэффициенту извилистости, используемому в ряде научных публикаций, где он трактуется как коэффициент, характеризующий извилистость диффузионных путей в поровом пространстве. По нашему мнению, коэффициент K_c , наряду с извилистостью диффузионных путей, определяется еще рядом геометрических факторов, таких как наличие тупиковых и замкнутых пор, четочность капилляров и т. д., и в широком смысле его следует называть коэффициентом коммуникации водопроводящих путей. Коэффициент K_c практически не зависит от сорбционных характеристик водорастворимых соединений, а зависит от степени водонасыщения пористой среды, изменяясь от сотых значений при очень низкой степени водонасыщения до значений 0,7–0,95

при полном водонасыщении. С учетом этой закономерности, определив в исследуемом грунте зависимость коэффициент K_c от степени водонасыщения для одного водорастворимого соединения, лучше с минимальной сорбционной способностью, можно использовать этот коэффициент для различных сорбируемых водорастворимых соединений в том же грунте. Это существенно уменьшает объем необходимых экспериментальных исследований для определения эффективных коэффициентов диффузии радионуклидов в верхнем аэрируемом слое грунтов, где степень влагонасыщения может варьировать в широких пределах.

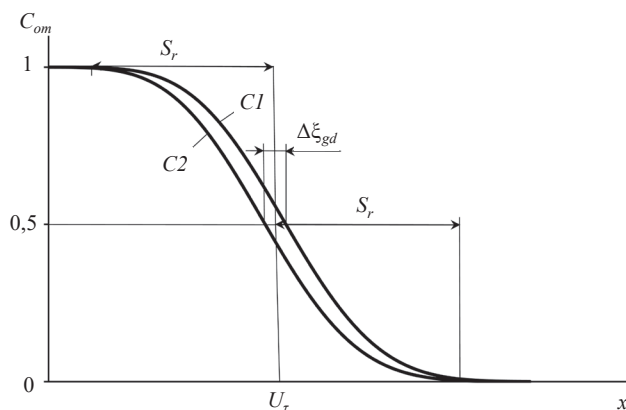
Следует обратить внимание, что коэффициент гидродисперсии имеет квадратичную зависимость от линейной скорости потока влаги. В литературе для выражения аналогичной зависимости предлагается ряд эмпирических формул с различным показателем степени при V от 1 до 2 [2; 6; 9]. Часто используется эмпирическая линейная зависимость без надлежащего обоснования величины параметра гидродисперсии l :

$$D_s = D_{pr} + lV,$$

где l – параметр гидродисперсии. Такая зависимость может быть оправдана как эмпирическая зависимость для частного случая, когда наблюдается линейная зависимость коэффициента массообмена α от скорости потока влаги при наличии турбулентности [2]. Для типичного диапазона изменения линейной скорости фильтрационного потока в грунтах V в пределах 10^{-4} – 10^{-6} м/с, по нашему мнению, наиболее приемлема квадратичная зависимость коэффициента гидродисперсии от линейной скорости потока влаги и обратно пропорциональная зависимость от коэффициента массообмена, соответствующая асимптотическому решению уравнения конвективной диффузии с учетом неравновесной сорбции, выраженная формулой (2).

Анализ неравновесных процессов при конвективном переносе водорастворимых соединений показывает, что коэффициент продольной гидродисперсии следует рассматривать не как физическую характеристику переноса, а как комплексный параметр, характеризующий процесс рассеяния фронта распространения водорастворимого соединения. Это рассеяние может происходить по двум основным причинам: неравновесный характер сорбции водорастворимого соединения дисперсной фазой либо неоднородности макроструктуры и линейной скорости жидкостного потока в направлении, перпендикулярном распространению водорастворимых соединений. Следует отметить, что в данной публикации не рассматриваются вопросы, связанные с макро-неоднородностями в направлении, перпендикулярном основному конвективному потоку влаги, которые могут вызвать поперечную гидродисперсию. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения и будут проанализированы в последующих публикациях.

На рисунке представлено характерное распределение концентраций водорастворимых в твердой и жидкой компонентах дисперсных сред при конвективно-диффузионном переносе. Анализ этого распределения показывает, что величина зоны гидродиффузионного рассеяния concentra-



Характерное распределение радионуклидов при конвективно-диффузионном переносе

Typical distribution of radionuclides during convective-diffusive transfer

ций S_r в первом приближении составляет значение $4(D_s\tau)^{0,5}$ и симметрично простирается в двух направлениях от положения средней концентрации. На основании такого распределения, если оно получено экспериментальным или расчетным путем, можно оценить суммарный коэффициент гидродисперсии по формуле

$$D_s = \frac{s_r^2}{16\tau}.$$

Это можно использовать для экспериментального определения суммарного коэффициента гидродисперсии радионуклидов в лабораторных и полевых исследованиях по фактическому рассеиванию фронта конвективно-диффузионного распространения водорастворимых соединений.

Анализ влияния гидродисперсии на распространение радиоактивных загрязнений. Корректная оценка коэффициента гидродисперсии радионуклидов в природных дисперсных средах позволит более адекватно и точно рассчитать динамику распространения радиоактивных загрязнений в этих средах. Такие задачи могут возникать при оценке проницаемости различных искусственных и естественных барьеров, используемых в качестве экранов распространения радиоактивных загрязнений в природной среде. Из рисунка видно, что зона гидродиффузионного рассеяния радионуклидов может намного опережать положение фронта средней концентрации. Это, безусловно, повлияет на оценку времени проницаемости используемых барьеров для задержки радионуклидов.

При оценке распространения радиоактивных загрязнений в водоносных горизонтах на большие периоды можно использовать упрощенную математическую модель конвективно-диффузионного переноса радионуклидов, основанную на равновесной сорбции радионуклидов. Но при этом необходимо учитывать фактические значения суммарного коэффициента гидродисперсии, предварительно рассчитанные в соответствии со значениями индивидуальных коэффициентов распределения и массообмена радионуклидов. Это позволяет использовать известные решения задач конвективно-диффузионного переноса с равновесной сорбцией, введя вместо значения эффективного коэффициента молекулярной диффузии соответствующее значение суммарного коэффициента гидродисперсии. Необходимо обратить внимание при численном расчете конвективно-диффузионных процессов переноса водорастворимых соединений на неравномерность одновременного введения в расчетную схему неравновесных характеристик сорбции и эмпирических коэффициентов гидродисперсии, так как эти факторы на альтернативной основе определяют один и тот же процесс – гидродисперсионное рассеивание.

Особый интерес представляют задачи конвективно-диффузионного переноса радиоактивных загрязнений в деятельном слое грунтов, где происходят периодические процессы переноса тепла и влаги. В таких случаях скорость конвективного потока влаги за счет периодического выпадения осадков и испарения влаги в поверхностном слое будет также периодически изменяться. Анализ таких процессов приведен в публикации авторов [10]. Была получена формула, позволяющая рассчитать распределение водорастворимых соединений с достаточной точностью при вариации скорости фильтрационного потока, включая знакопеременную или периодическую зависимость скорости фильтрационного потока от времени

$$C1(X, \tau) = C_0 + 0,5(C_{\text{вх}} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \int_0^\tau \frac{V}{(K_d / W + 1)} d\tau'}{2 \sqrt{\int_0^\tau \frac{V^2}{\alpha} \frac{K_d W^2}{(K_d + W)^3} d\tau'}} \right) \right].$$

С учетом того, что коэффициент молекулярной диффузии тоже будет изменяться при изменении влажности в аэрируемом слое, суммарный эффективный коэффициент гидродисперсии и молекулярной диффузии можно выразить формулой

$$D_s = \frac{K_d W^2}{(K_d + W)^3} \int_0^\tau (V^2 d\tau') \frac{1}{\alpha \tau} + \frac{W}{(K_d + W) \tau} \int_0^\tau D_{pr} d\tau'.$$

Распределение водорастворимого соединения при вариации скорости фильтрационного потока будет описываться S -образной кривой с координатой фронта средней концентрации, определяемой уравнением

$$x_{0,5} = \int_0^{\tau} \frac{V}{(K_d / W + 1)} d\tau'.$$

При этом протяженность области рассеяния водорастворимого соединения в обоих направлениях от положения фронта средней концентрации будет определяться выражением

$$S_r = 4\sqrt{D_s\tau}.$$

С учетом того, что среднеинтегральная скорость потока влаги в деятельном слое может быть близка к 0, основной перенос в этом слое будет определяться гидродисперсией, зависящей от квадрата среднеинтегральной скорости потока влаги, и среднеинтегральным эффективным коэффициентом молекулярной диффузии. Поэтому в деятельном слое перенос радионуклидов будет сравнительно медленным. По предварительным оценкам и при толщине деятельного слоя 10–15 м радионуклиды, выпавшие на поверхность деятельного слоя, могут достигнуть водоносного горизонта через 100 и более лет. При этом необходимо обращать внимание на наличие на территории объекта участков закрытого водосбора, где может концентрироваться склоновый сток дождевых и талых вод, загрязненных радионуклидами. В таких случаях скорость инфильтрации загрязненных вод на участках закрытого водосбора может быть выше более чем на десятичный порядок соответствующих значений на горизонтальных поверхностях территории. Это может существенно ускорить время достижения радиоактивных загрязнений водоносных горизонтов на указанных участках.

Следует отметить, что для достоверной оценки распространения радиоактивных загрязнений в деятельном слое территории необходимо определить комплекс характеристик тепло- и массопереноса, а также полный комплекс характеристик сорбции и переноса радионуклидов с учетом кинетики массообмена ими между жидкой и твердой фазами. При этом следует учесть особенности рельефа природно-территориального комплекса объекта.

Выводы

1. Анализ численных и асимптотических решений уравнения конвективно-диффузионного переноса радионуклидов с учетом неравновесного характера их сорбции и наличия молекулярной диффузии показывает, что для коэффициента гидродисперсии радионуклидов характерна квадратичная зависимость от линейной скорости потока влаги и обратно пропорциональная зависимость от коэффициента массообмена, характеризующего скорость установления сорбционного равновесия между радионуклидами, находящимися в поровом растворе и сорбированными твердой компонентой среды. Численными и аналитическими расчетами подтверждено предположение о аддитивности вкладов коэффициента гидродисперсии и эффективного коэффициента диффузии радионуклидов в оценку величины зоны рассеяния радиоактивных загрязнений.

2. В перечень характеристик, необходимых для оценки распространения радиоактивных загрязнений, следует в обязательном порядке наряду с коэффициентами распределения включать коэффициенты массообмена радионуклидов. Расчет процессов конвективно-диффузионного переноса радионуклидов следует проводить в основном с учетом неравновесного характера их сорбции твердой компонентой. При расчетах в водоносных горизонтах в установившихся режимах можно использовать решения, соответствующие равновесному характеру сорбции с учетом суммарного значения коэффициента гидродисперсии, предварительно полученного по оценкам с использованием индивидуальных коэффициентов распределения и массообмена радионуклидов в конкретных грунтах. Оценка гидродисперсии грунтов с помощью отдельных водорастворимых соединений или нейтральной несорбируемой метки не учитывает специфику сорбционных свойств радионуклидов и не является достаточно достоверной и точной.

3. В деятельном слое, где происходят периодические изменения величины и направления скорости конвективного потока влаги, основной вклад в перенос радионуклидов вносят эффективная молекулярная диффузия и гидродисперсия, определяемая среднеинтегральной величиной квадрата линейной скорости инфильтрационного потока влаги. Это обуславливает сравнительно

малую величину скорости переноса радионуклидов в направлении водоносных горизонтов и при толщине деятельного слоя 10–15 м радионуклиды, выпавшие на поверхность деятельного слоя, могут достигнуть водоносного горизонта только через 100 и более лет. При наличии на территории объекта участков закрытого водосбора, где может концентрироваться склоновый сток дождевых и талых вод, загрязненных радионуклидами, скорость инфильтрации загрязненных вод на этих участках может более чем на десятичный порядок быть выше соответствующих значений на горизонтальных поверхностях территории. В таких случаях необходимо учитывать влияние специфики рельефа территории объекта на распространение радиоактивных загрязнений.

Список использованных источников

1. Шестаков, В. М. Гидрогеодинамика / В. М. Шестаков. – М., 2009. – 334 с.
2. Николаевский, В. Н. Конвективная диффузия в пористых средах / В. Н. Николаевский // Прикладная математика и механика. – 1959. – Т. 23, № 6. – С. 1042–1050.
3. Румынин, В. Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод / В. Г. Румынин. – СПб., 2020. – 559 с.
4. Рошаль, А. А. Методы определения миграционных параметров / А. А. Рошаль. – М., 1980. – 62 с.
5. Серебряный, Г. З. Аналитическая модель миграции радионуклидов в пористых средах / Г. З. Серебряный, М. Л. Жемжуров // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 6. – С. 146–150.
6. Гишкелюк, И. А. Математическое моделирование конвективной диффузии растворимых соединений в почве при не-изотермическом влагопереносе / И. А. Гишкелюк, С. П. Кундас, Н. Н. Гринчик // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 5. – С. 924–935.
7. Рачинский, В. В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии / В. В. Рачинский. – М., 1964. – 135 с.
8. Основы расчета и оптимизации ионообменных процессов. – М., 1972. – 175 с.
9. Бровка, Г. П. Расчет конвективного переноса водорастворимых соединений с учетом кинетики сорбции / Г. П. Бровка // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74, № 3. – С. 25–29.
10. Бровка, Г. П. Динамика сорбции минеральных водорастворимых соединений в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка, И. Н. Дорожок // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя хімічных навук. – 2010. – № 3. – С. 20–26.
11. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массопереноса в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Мн., 2011. – 363 с.
12. Бровка, Г. П. Асимптотическое решение задачи конвективно-диффузионного переноса сорбируемых водорастворимых соединений в дисперсных средах с учетом кинетики сорбции и диффузии в поровом растворе / Г. П. Бровка // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97, № 7. – С. 1812–1817.

References

1. Shestakov V. M. *Hydrogeodynamics*. Moscow, 2009. 334 p. (in Russian).
2. Nikolaevsky V. N. Convective diffusion in porous media. *Prikladnaya matematika i mekhanika = Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1959, vol. 23, no. 6, pp. 1042–1050 (in Russian).
3. Rumynin V. G. *Theory and Methods of Studying Groundwater Pollution*. St. Petersburg, 2020. 559 p. (in Russian).
4. Roshal A. A. *Methods for Determining Migration Parameters*. Moscow, 1980. 62 p. (in Russian).
5. Serebryanyi G. Z., Zhemzhurov M. L. Analytical model of migration of radionuclides in porous media. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2003, vol. 76, no. 6, pp. 1369–1374. <https://doi.org/10.1023/b:joep.0000012043.34825.b6>
6. Gishkelyuk I. A., Kundas S. P., Grinchik N. N. Mathematical modeling of convective diffusion of soluble compounds in the soil at nonisothermal moisture transfer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, vol. 81, no. 5, pp. 963–975. <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0117-9>
7. Rachinsky V. V. *Introduction to the General Theory of Sorption and Chromatography Dynamics*. Moscow, 1964. 135 p. (in Russian).
8. *Fundamentals of Calculation and Optimization of Ion Exchange Processes*. Moscow, 1972. 175 p. (in Russian).
9. Brovka G. P. Calculation of convective transfer of water-soluble compounds, taking into account sorption kinetics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2001, vol. 74, no. 3, pp. 568–574. <https://doi.org/10.1023/a:1016787706715>
10. Brovka G. P., Dorozhok I. N. Dynamics of sorption of mineral water-soluble compounds in natural dispersed media. *Vestsi Natsyyanal'най akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2010, no. 3, pp. 20–26.
11. Brovka G. P. *Interrelated Processes of Heat and Mass Transfer in Natural Dispersed Media*. Minsk, 2011. 363 p. (in Russian).
12. Brovka G. P. Asymptotic solution of the problem of convective-diffusive transport of sorbable water-soluble compounds in dispersed media with regard to the kinetics of sorption and diffusion in the pore solution. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2024, vol. 97, no. 7, 1814–1819. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-03062-2>

Информация об авторах

Бровка Геннадий Петрович – д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. E-mail: brovka_gp@tut.by.
Дорожок Инга Николаевна – науч. сотрудник. E-mail: ingadorozhok@list.ru.

Information about the authors

Brovka Gennady P. – D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher. E-mail: brovka_gp@tut.by.
Dorozhok Inga N. – Researcher. E-mail: ingadorozhok@list.ru.