

УДК 532.543/.517.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗБАВЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РАССОЛОВ В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ

Т.П. Любимова¹, А.П. Лепихин², Я.Н. Паршакова¹, А.И. Тиунов²¹*Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия*²*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*

Предложена и реализована трехуровневая схема расчетов переноса и разбавления высокоминерализованных рассолов в водных объектах. На первом уровне используется одномерная гидродинамическая модель, построенная на основе системы уравнений Сен-Венана и охватывающая всю расчетную область. Результаты, полученные в рамках одномерной модели, используются при задании граничных условий в модели второго уровня, базирующейся на системе уравнений мелкой воды. Численные данные двумерной модели на втором уровне являются достаточными, если в створе начального разбавления не наблюдается значительной плотностной стратификации и допустимо, по условиям задачи, использование гидродинамических характеристик, осредненных по глубине потока. В противном случае необходимо трехмерное рассмотрение задачи. Трехмерное моделирование проведено для участка водного объекта, примыкающего к месту сброса избыточных рассолов. Рассмотрены два варианта расположения выпускного устройства. Установлено, что в случае, когда выпускное устройство находится вблизи дна, наблюдается значительная неоднородность распределения примеси по глубине. Расположение источника примеси вблизи свободной поверхности ведет к лучшему разбавлению рассолов и позволяет уменьшить накопление загрязняющих примесей в придонной области. На основании результатов трехмерных расчетов рекомендовано расположение устройств сброса высокоминерализованных тяжелых рассолов вблизи свободной поверхности.

Ключевые слова: высокоминерализованные рассолы, турбулентный перенос примеси, одномерная модель, двумерная модель, трехмерное моделирование

NUMERICAL MODELING OF DILUTION AND TRANSPORT OF HIGHLY MINERALIZED BRINES IN TURBULENT FLOWS

T.P. Lyubimova¹, A.P. Lepikhin², Ya.N. Parshakova¹ and A.A. Tiunov²¹*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia*²*Mining Institute UB RAS, Perm, Russia*

A three-level scheme is suggested for the numerical simulation of transport and dilution of highly mineralized brines in water bodies. The first step involves the use of the one-dimensional hydrodynamic model based on the Sen-Venan equations, which covers the entire computational domain. The results obtained in the framework of the one-dimensional model are used to set boundary conditions for the second-level model based on the shallow water equations. Numerical data obtained in the framework of the two-dimensional model are sufficient if there is no significant density stratification at the initial dilution cross-section and if the depth-averaged characteristics are applicable to the problem conditions. In the opposite case, three-dimensional consideration is required. Three-dimensional modeling was carried out for the water body domain close to the surplus brine discharge. Two variants of the location of a discharge device are considered. It is found that in the case when the discharge device is located near the bottom, substantial non-uniformity of the pollutant distribution over the depth takes place. The location of the discharge device near the free surface results in much better dilution of brines and reduces the pollutant accumulation near the bottom. Thus, the results of three-dimensional calculations allow us to recommend the location of discharge devices for highly mineralized heavy brines near the free surface.

Key words: highly mineralized brines, hydrodynamic model, dilution, density stratification, turbulent flow

1. Введение

Крупнейшим калийным месторождением России является Верхне-Камское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКМС), разрабатываемое с XVI века, где сначала добывалась только поваренная соль, а с 20-х годов XX века ведется добыча хлористого калия. Добываемая руда представляет собой смесь хлористого калия, хлористого магния и хлористого натрия. При этом «полезным компонентом», как правило, является хлористый калий. В настоящее время обогащение калийных руд производится, в большинстве случаев, в водной фазе. Сухое обогащение, основанное на использовании метода электростатической сепарации, эффективно только при достижении достаточно специфических требований к составу руд. При проведении процессов обогащения в водной фазе для растворения одной тонны руды требуется около 1 м³ воды. В связи с этим возникает проблема отведения и утилизации избыточных рассолов. Несмотря на развитие технологий обогащения и очистки отводимых рассолов, в настоящее время, не только в районе ВКМКМС, но и в Европе, практически единственным реальным способом утилизации избыточных рассолов является их сброс в поверхностные водные объекты.

Поскольку гидрологический и гидрохимический режим водных объектов характеризуется значительной внутригодовой изменчивостью, а производственные процессы, в ходе которых продуцируются сточные воды, достаточно постоянны в годовом разрезе, то необходима синхронизация этих процессов, для того чтобы существенно снизить нагрузку в маловодный период. Синхронизация может достигаться путем использования накопителей, позволяющих проводить сброс сточных вод в зависимости от гидрологического и гидрохимического режимов водных объектов с соблюдением нормативных требований к качеству воды в контрольном створе. На предприятиях калийной промышленности в качестве таких накопителей целесообразно использовать шламохранилища (пруды-отстойники), способные накапливать более чем годовой объем отводимых рассолов. При реализации данной схемы отведения сточных вод центральное место занимает эффективный расчет процессов разбавления отводимых избыточных рассолов при различных гидрологических условиях природных водных объектов. Для этих целей в настоящей работе предложена многоуровневая гидродинамическая модель, описывающая процессы миграции и разбавления избыточных рассолов в масштабах Верхней Камы.

2. Гидродинамические модели процессов разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов

Для того чтобы модели были достаточно корректными, они должны учитывать характерные особенности не только водных объектов, но и самих отводимых стоков. Река Кама в районе Соликамско–Березниковского промузла является зоной переменного подпора от Камской ГЭС и характеризуется сложным гидрологическим режимом, а отводимые рассолы имеют высокую плотность, существенно превышающую плотность пресной воды. С учетом этого в настоящей работе предложена трехуровневая система описания рассматриваемых процессов, включающая одномерную, двумерную и трехмерную модели.

2.1. Одномерная модель

В настоящее время имеется крайне ограниченное количество гидрологических постов по измерению уровней воды на водохранилищах. Поэтому для обеспечения корректного задания граничных условий решаемой задачи в двумерной и трехмерной

постановках вначале проводились расчеты основных гидравлических характеристик, в том числе и уровней воды, с помощью одномерной модели, построенной для всего Камского водохранилища в целом от поселка Тюлькино до Камской ГЭС. Протяженность участка составляет 350 км.

Одномерная модель основывается на системе уравнений Сен-Венана:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2(x,t)}{F(x,t)} \right) + F(x,t) g \left(l - \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{gF(x,t)Q|Q|}{K^2(x,t)},$$

$$\frac{\partial F(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = \sum_{k=1}^N q_k(t) \delta(x-x_k),$$

$$F(x,t) = B(x)h(x,t),$$

где t — время [сек], $Q(x,t)$ — расход воды в водотоке [$\text{м}^3/\text{сек}$], $F(x,t)$ — площадь поперечного сечения водотока [м^2], x_k — положение точечного источника [м], $h(x,t)$ — средняя по сечению глубина [м], $B(x)$ — эффективная характерная ширина водотока [м], l — уклон свободной водной поверхности, N — общее количество притоков, на которых ведутся регулярные гидрометрические наблюдения (реки Яйва, Косьва, Иньва, Обва, Чусовая), $\delta(x)$ — дельта-функция, g — ускорение силы тяжести [$\text{м}/\text{сек}^2$], $K(x,t) = F(x,t)R^{2/3}(x,t)/n(x)$ — модуль расхода [$\text{м}^3/\text{сек}$], $R(x,t)$ — гидравлический радиус водотока [м], $n(x)$ — коэффициент шероховатости дна [$\text{сек}/\text{м}^{1/3}$], $q_k(x,t)$ — боковой приток воды из k -го источника [$\text{м}^3/\text{сек}$].

Для численной реализации одномерной модели использовался программный продукт HEC-RAS v.4.1 [1] Его характеристики и опыт применения в решении задач речной гидравлики можно найти в [2]. При одномерном численном моделировании в качестве граничных условий использовались расход воды в верхнем створе реки Камы (поселок Тюлькино) и уровень воды (или расход воды) в верхнем бьефе КамГЭС. Учитывались расходы воды по наиболее крупным притокам — рекам Яйве, Косьве, Иньве, Обве, Чусовой, Сылве. В результате расчетов получены распределения гидравлических характеристик потока для расчетной области, охватывающей все Камское водохранилище.

2.2. Двумерная модель

Двумерное рассмотрение является более полным, чем одномерное, однако, проведение расчетов в двумерной постановке для исследуемой области со значительной протяженностью (350 км) затруднено в силу ограниченности вычислительных ресурсов. Поэтому двумерная модель строилась для верхней части Камского водохранилища — для участка в 60 км, простирающегося от Березниковского моста (город Березники) до поселка Кама. К тому же на этом участке располагаются все калийные предприятия Соликамско-Березниковского промузла. Гидрометрических постов по замерам уровня воды и расходов в настоящее время очень мало; для Камского водохранилища имеются лишь гидрометрические данные по постам: р. Кама - п. Тюлькино, р. Кама - г. Березники и Камская ГЭС, поэтому при задании граничных условий на выходе для двумерной модели использовались уровни воды и расходы на участке между постами, рассчитанные по одномерной модели.

В основу двумерной модели полагается хорошо известная система уравнений мелкой воды [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{q_1^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) &= \frac{\partial}{\partial x_1} (N_{11} - N_p) + \frac{\partial N_{12}}{\partial x_2} + B_1, \\ \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{q_2^2}{H} \right) &= \frac{\partial}{\partial x_2} (N_{22} - N_p) + \frac{\partial N_{12}}{\partial x_1} + B_2, \\ \frac{\partial q_1}{\partial x_1} + \frac{\partial q_2}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} &= 0, \end{aligned}$$

где $B_1 = f q_2 + \gamma^2 \rho_a W \cos \theta - \frac{g}{C_u^2} \frac{1}{\rho} \frac{q_1 (q_1^2 + q_2^2)^{1/2}}{H^2} + \rho_a \frac{\partial H}{\partial x_1} + \rho g H \frac{\partial h}{\partial x_1}$;

$$B_2 = -f q_1 + \gamma^2 \rho_a W \sin \theta - \frac{g}{C_u^2} \frac{1}{\rho} \frac{q_2 (q_1^2 + q_2^2)^{1/2}}{H^2} + \rho_a \frac{\partial H}{\partial x_2} + \rho g H \frac{\partial h}{\partial x_2};$$

$$N_p = \int_{-h}^{\eta} p dx_3 = \rho g \frac{H^2}{2} + H \rho_a; \quad N_{11} \approx 2\varepsilon_{11} \frac{\partial q_1}{\partial x_1}; \quad N_{22} \approx 2\varepsilon_{22} \frac{\partial q_2}{\partial x_2}; \quad N_{12} \approx \varepsilon_{12} \left(\frac{\partial q_1}{\partial x_2} + \frac{\partial q_2}{\partial x_1} \right);$$

$$H = h + \eta$$

Здесь $k=1, 2$; q_k — поток количества жидкости $q_k = \int_{-h}^{\eta} \rho v_k dx_3 = \rho \int_{-h}^{\eta} v_k dx_3$, где v_k — компоненты скорости [м/сек]; ε_{ik} — обобщенные коэффициенты вихревой вязкости (для изотропного характера турбулентности $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{12} = \varepsilon$); x_1, x_2, x_3, t — декартовы координаты [м] и время [сек]; η и h — возвышение свободной водной поверхности и глубина [м], измеряемые от базовой поверхности (не обязательно горизонтальной); $f = 2H\omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса [кг·м/сек²], где ω — скорость углового вращения [рад/сек] Земли, φ — широта местности [рад]; g — ускорение силы тяжести [м/сек²]; C_u — коэффициент Шези, характеризующий шероховатость дна; ρ — плотность жидкости [кг/м³]; γ^2 — безразмерный коэффициент ветрового напряжения, примерно равный 0,0026; ρ_a — плотность воздуха [кг/м³]; W — скорость ветра [м/сек]; θ — угол между осью x_1 и направлением ветра [рад].

Уравнение конвективно-диффузионного переноса записывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} &= p(\vec{r}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right), \\ p(\vec{r}) &= \sum_{k=1}^N q_k \delta(\vec{r} - \vec{r}_k), \end{aligned}$$

где c — концентрация загрязняющего вещества [мг/л]; $p(\vec{r})$ — удельная интенсивность точечных источников загрязнения [мг/(л·сек)]; N — количество источников, $\delta(\vec{r} - \vec{r}_k)$ — дельта-функция; \vec{r}_k — координаты точечного источника; $D_{ii} = D_{ii}^m + D_{ii}^t$ — полный коэффициент диффузии (в рассматриваемой модели он предполагается диагональным, $i=1, 2$); D_{ii}^m и D_{ii}^t — коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии [м²/сек].

В качестве граничных условий для гидродинамического блока двумерной модели задаются расход воды в верхнем створе и уровень воды в нижнем створе. Характерной особенностью водного объекта на рассматриваемом участке является его сложный

донный рельеф. Морфометрические данные расчетной области брались из «Атласа единой глубоководной системы европейской части РФ» с учетом материалов детальных батиметрических съемок (данных о глубинах). Для адекватного задания исследуемого участка строилась расчетная сетка, включающая более 40000 элементов.

Численное решение задачи в рамках двумерного подхода находится с помощью лицензионного программного продукта SMS v.10 (Surface-water Modeling System), разработанного в Лаборатории моделирования окружающей среды Университета Brigham Young по заказу и при участии Центра гидравлических исследований корпуса военных инженеров армии США и Федерального управления по автомобильным дорогам США. Данный пакет программ использовался ранее (см. работы [4, 5]) для моделирования гидродинамических режимов рек Амура и Сылвы.

2.3. Трехмерная модель

Характерной особенностью отводимых избыточных рассолов является их значительная минерализация ~ 300 г/л и, соответственно, высокая плотность $\rho = 1200$ кг/м³. При подавлении вертикальных турбулентных пульсаций такие «тяжелые» рассолы могут распространяться на значительные расстояния без заметного снижения концентрации. По этой причине расчет зон загрязнения в рамках двухмерной постановки на основе уравнений мелкой воды является корректным только при следующих условиях: избыточные рассолы отводятся совместно со значительным количеством менее плотных сточных вод других водопользователей; рассеивающие водовыпуски достаточно эффективные, такие, что уже в створе начального разбавления не наблюдается существенной стратификации; по условиям задачи допустимо использование характеристик, осредненных по глубине потока. В противном случае для корректного описания распространения рассолов в водоемах необходимо трехмерное рассмотрение задачи. В то же время, в силу необходимости использования достаточно подробных сеток и ограниченности вычислительных ресурсов, проведение расчетов в трехмерной постановке возможно лишь для сравнительно небольшого участка реки.

В настоящей работе в трехмерной постановке исследовался сброс отработанной воды из одиночного источника и изменение концентрации примеси на участках длиной 150 и 300 метров, примыкающих к месту сброса избыточных рассолов.

Расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед, содержащий источник в виде прямоугольной щели высотой $h = 0,1$ м и шириной $l_h = 10$ м, располагающийся на одинаковом расстоянии от боковых стенок. Из щели с постоянной скоростью \vec{u} [м/сек] вытекал рассол с концентрацией C_0 [вес%]. Высота расчетной области d составляла 10 м, ширина H — 30 м, длина L — 150 м. Трехмерное численное моделирование включало два варианта расположения выпускного отверстия. В первом варианте щель располагалась вблизи дна (Рис. 1), во втором варианте — на расстоянии 1 м от свободной поверхности воды.

На нижней границе расчетной области, имитирующей речное дно, ставились условия прилипания и отсутствия потока примеси:

$$v_1 = v_2 = v_3 = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0.$$

Верхняя граница области, соответствующая свободной поверхности жидкости, считалась недеформируемой; на ней ставились условия отсутствия нормальной компоненты скорости и касательных напряжений, а также условие отсутствия потока примеси.

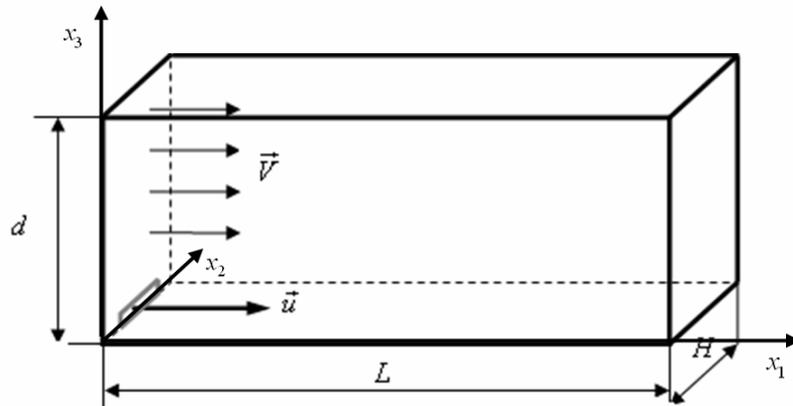


Рис. 1. Геометрия расчетной области

На боковых границах расчетной области выполнялись условия равенства нулю производной скорости по нормали и отсутствия потока примеси:

$$\frac{\partial v_1}{\partial n} = \frac{\partial v_2}{\partial n} = \frac{\partial v_3}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0.$$

На входе расчетной области полагались постоянными скорость основного потока \vec{V} , имеющая одну ненулевую компоненту, и концентрация, равная фоновой концентрации примеси в реке:

$$z = 0: \quad v_1 = V, \quad v_2 = 0, \quad v_3 = 0, \quad c = C_{eff}.$$

На выходе ставились «мягкие» граничные условия: обращались в нуль производные по координате x от всех полевых функций.

В плоскости выпускного отверстия (щели) скорость вытекания рассола и концентрация примеси считались постоянными:

$$v_1 = u, \quad v_2 = 0, \quad v_3 = 0, \quad c = C_0.$$

В качестве начальных условий задавалась фоновая концентрация примеси C_{eff} , распределенная однородно, и скорость основного течения, равная скорости на входе расчетной области $\vec{v} = \vec{V}$.

Расчеты проводились с использованием коммерческого пакета Fluent 6.3.26, реализующего метод конечных объемов. Решение задачи находилось в рамках нестационарного изотермического подхода и стандартной $k - \epsilon$ модели турбулентности.

Уравнения движения записывались в тензорной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \right] + \rho g_i, \end{aligned}$$

где ρ — плотность, v_i — компоненты вектора скорости ($i, j = 1, 2, 3$), μ — кинематическая вязкость [м²/сек]. Турбулентная вязкость μ_t есть функция турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε : $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ [м²/сек], где C_μ — константа.

Уравнения для турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации представлялись в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned}$$

Здесь $G_k = \mu_t S^2$ — генерация турбулентной кинетической энергии за счет среднего градиента скорости; где $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ — норма тензора средней скорости деформации; $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$; $G_b = -\frac{g_j (\mu_t / \rho)}{\text{Pr}_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j}$ — генерация турбулентной кинетической энергии за счет плавучести, где g_j — ускорение силы тяжести, Pr_t — турбулентное число Прандтля; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ — константы.

Поскольку вектор ускорения силы тяжести \vec{g} направлен вертикально вниз и в случае устойчивой стратификации $\frac{\partial \rho}{\partial x_3} < 0$, слагаемое, описывающее генерацию турбулентной кинетической энергии за счет плавучести, отрицательно, что означает уменьшение турбулентной кинетической энергии за счет плавучести. Это явление подробно обсуждается в [6].

Уравнение переноса примеси имело вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} c) = -\nabla \cdot \vec{J}.$$

Здесь \vec{J} — диффузионный поток примеси, определяемый выражением $\vec{J} = -\rho(D_m + D_t) \nabla c$, где D_m — коэффициент молекулярной диффузии, D_t — эффективный коэффициент турбулентной диффузии, зависящий от турбулентной вязкости μ_t : $D_t = (\mu_t / \rho) / \text{Sc}_t$. Значения гидродинамических констант принимались следующими [7]: $\text{Pr}_t = 0,85$; $\text{Sc}_t = 0,7$; $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Зависимость плотности от концентрации полагалась квадратичной $\rho = \rho_0 (1 + A \cdot c + B \cdot c^2)$, $\rho_0 = 999,99$, $A = 0,668$, $B = -0,123 \cdot 10^{-3}$; при этом изменения плотности по глубине достигали 10%. Рассматриваемая система характеризовалась физическими параметрами: кинематической вязкостью $\mu = 9,34 \cdot 10^{-7}$ м²/сек; коэффициентом молекулярной диффузии $D_m = 1,0 \cdot 10^{-9}$ м²/сек.

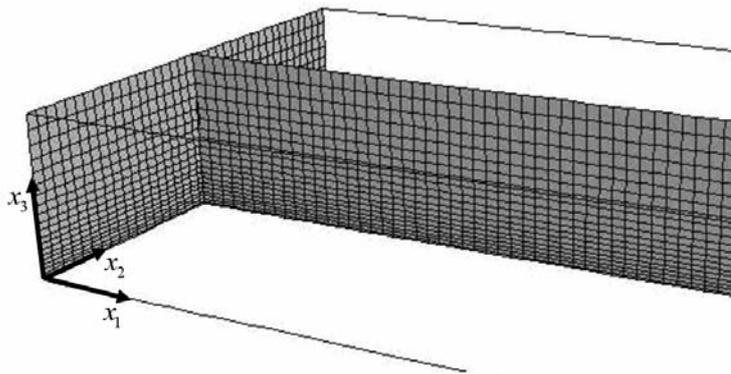


Рис. 2. Расчетная сетка. Сечение расчетной области плоскостью $x_2 = 15$ м

Исследуемая область разбивалась на ячейки со сгущением вблизи дна (Рис. 2). Сетка строилась с помощью программы Gambit 2.4.16. Выбор оптимального размера сетки осуществлялся на основании данных, полученных при проведении расчетов на разных сетках. Минимальная размерность сетки составляла $76 \times 16 \times 11$ узлов в x_1, x_2, x_3 направлениях соответственно, максимальная — $236 \times 56 \times 51$. Тестовые расчеты показали, что оптимальной с точки зрения затрат машинного времени и точности вычислений является сетка размерностью $181 \times 41 \times 21$.

3. Численные результаты

Двумерные расчеты распространения возможных зон загрязнений от различных водовыпусков проводились для реки Камы (Камского водохранилища) при следующих граничных условиях: расход воды на входе расчетной области (в верхнем створе Камы на уровне поселка Тюлькино) составлял $850 \text{ м}^3/\text{сек}$; уровень воды на выходе поддерживался на отметке нормального подпорного горизонта — $108,5$ м. Полученное в расчетах для данных граничных условий поле скорости представлено на рисунке 3.

Основным источником загрязнения для Камского водохранилища является станция перекачки в Березниках, через которую более 70% от общего объема загрязняющих веществ поступает в водные объекты в пределах Соликамско–Березниковского промузла, а это примерно 50% Камского бассейна. Распределение зон загрязнения от данного стокового источника при штилевых условиях представлено на рисунке 4. Темным цветом обозначены зоны максимальной концентрации загрязняющих веществ.

На рисунках 5–9 приведены результаты трехмерного численного моделирования для первого варианта расположения стоковой щели. В расчет заложены значения: концентрации соли в выбрасываемом рассоле $C_0 = 300 \text{ г/л}$; скорость выброса рассола $u = 0,2 \text{ м/сек}$; скорость основного потока $V = 0,1 \text{ м/сек}$.

Как видно из рисунков 5-6, наблюдается значительная неоднородность распределения примеси по глубине: тяжелая примесь скапливается вблизи дна и переносится потоком, практически не меняя концентрации.

Рисунки 7–8 содержат результаты трехмерного численного моделирования для второго варианта, когда сброс производится из щели, расположенной на расстоянии 1 метра от свободной поверхности. Видно, что в этом случае наблюдается лучшее перемешивание: распределение концентрации по глубине является более однородным.

На рисунке 9 показаны зависимости концентрации от глубины на расстоянии 150 м от щели для двух рассмотренных вариантов расположения источника сброса. Сравнение результатов позволяет сделать вывод, что при конструировании выпускных сооружений

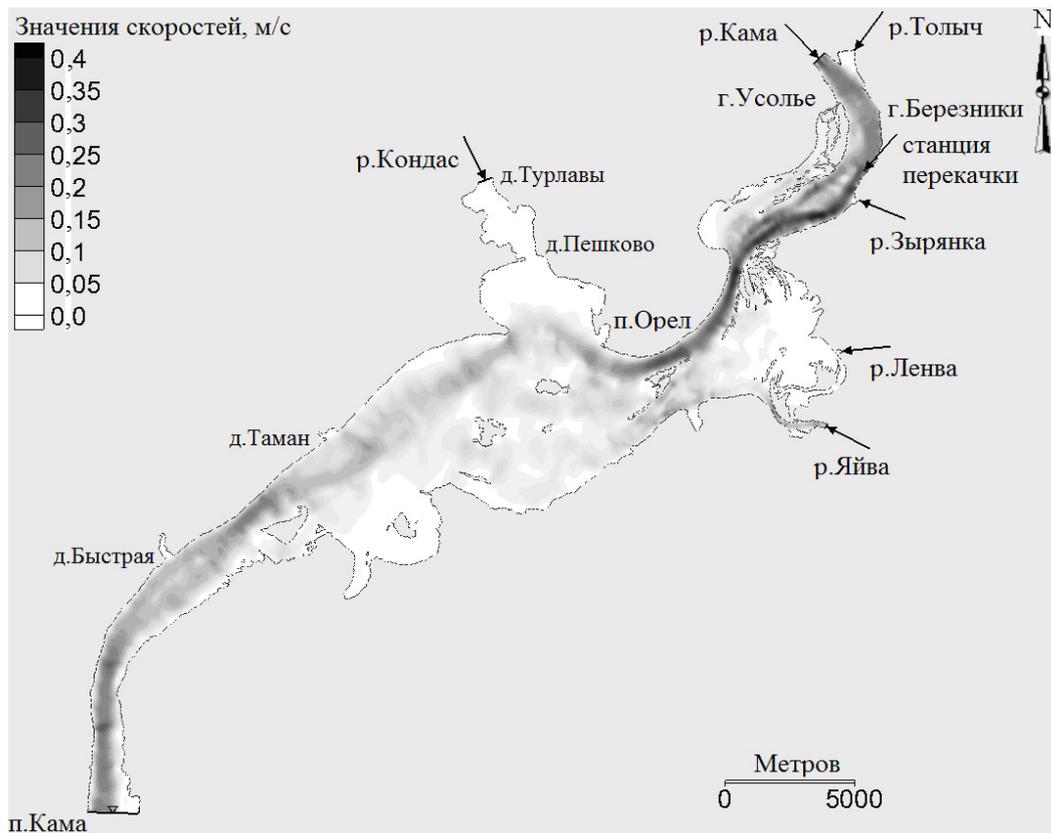


Рис. 3. Карта–схема распределения скоростей на расчетном участке от Березниковского моста (г. Березники) до п. Кама

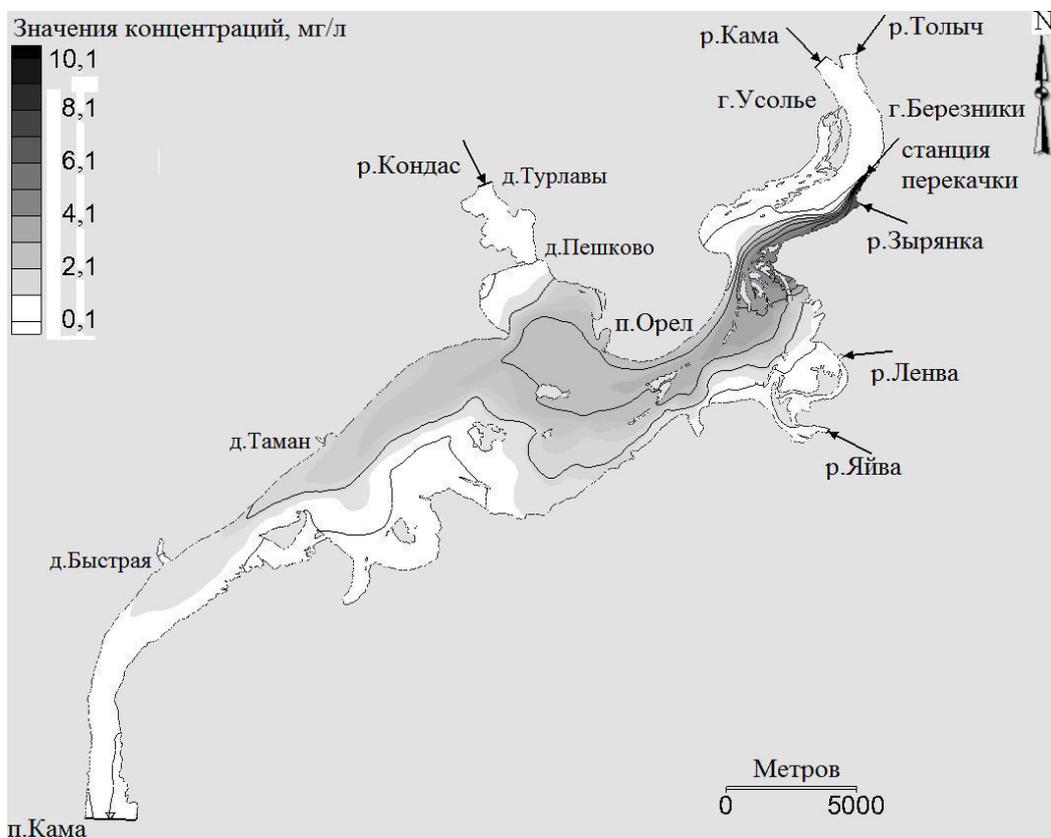


Рис. 4. Карта–схема распределения на расчетном участке от Березниковского моста до п. Кама относительной концентрации загрязняющих веществ от станции перекачки в Березниках

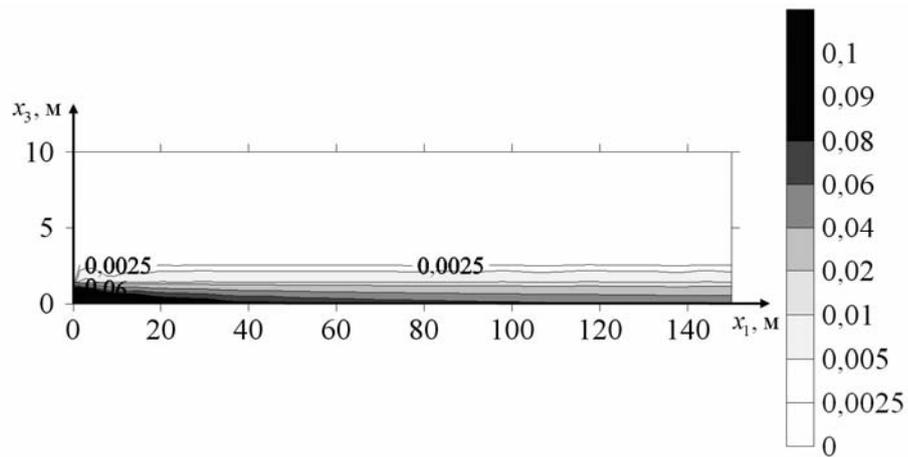


Рис. 5. Поле концентрации [вес%] в сечении $x_2 = 15$ м для щели, расположенной вблизи дна

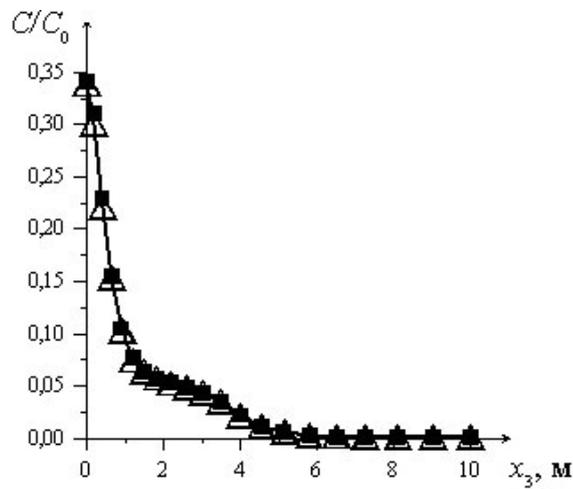


Рис. 6. Зависимости относительной концентрации от глубины на расстояниях $x_1 = 100$ м (■) и $x_1 = 150$ м (Δ) от щели, расположенной вблизи дна

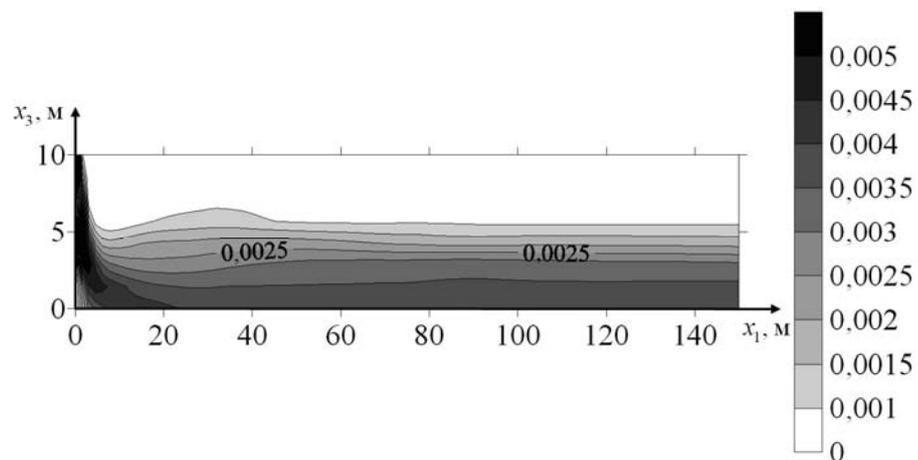


Рис. 7. Поле концентрации [вес%] в сечении $x_2 = 15$ для щели, расположенной на расстоянии 1 м от свободной поверхности

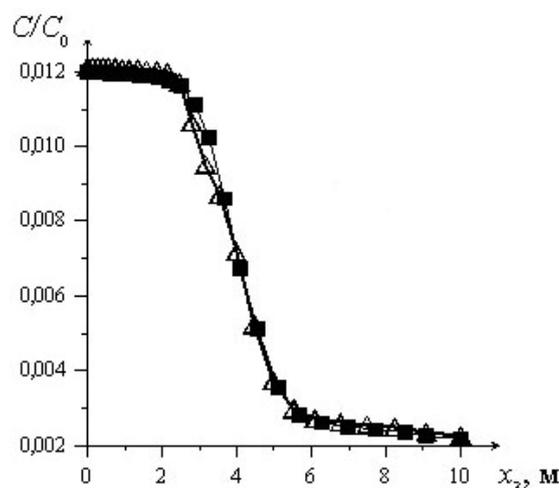


Рис. 8. Зависимости относительной концентрации от глубины при $x_1 = 100$ м (■) и $x_1 = 150$ м (Δ) для щели, расположенной на расстоянии 1 м от свободной поверхности

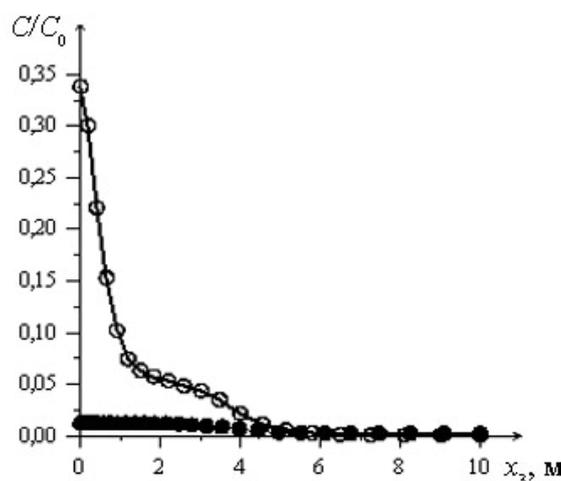


Рис. 9. Зависимости относительной концентрации от глубины на расстоянии $x_1 = 150$ м для щели, расположенной вблизи дна (○), и для щели, находящейся на расстоянии 1 м от свободной поверхности (●)

отверстия, из которых будет производиться выброс высокоминерализованных тяжелых рассолов, следует располагать вблизи свободной поверхности. Такое расположение способствует лучшему разбавлению рассолов и позволяет уменьшить накопление загрязняющих примесей вблизи дна.

При проведении трехмерных расчетов в настоящей работе на выходе расчетной области задавались «мягкие» граничные условия. В дальнейшем планируется для задания граничных условий на выходе использование численных данных, полученных в рамках двумерного подхода.

4. Заключение

1. Предложена и исполнена схема расчетов переноса и разбавления высокоминерализованных рассолов, поступающих в Камское водохранилище от предприятий калийной промышленности Верхне-Камского месторождения калийных магниевых солей, основанная на использовании одно-, дву- и трехмерной гидродинамических моделей.

2. Одномерная модель, основанная на численном решении системы уравнений Сен-Венана, реализована для всего Камского водохранилища. Расчетные характеристики, полученные в рамках этой модели, использованы при задании граничных условий для двумерной модели, построенной на основе системы уравнений мелкой воды для верхней части Камского водохранилища, включающей Соликамско–Березниковский промузел.

3. Трехмерные гидродинамические расчеты проведены для участка водного объекта, примыкающего к месту сброса избыточных рассолов. Рассмотрены две конфигурации расчетной области, отличающиеся расположением выпускного устройства. Показано, что в случае, когда источник примеси располагается вблизи дна, наблюдается значительная неоднородность распределения примеси по глубине: тяжелая примесь скапливается вблизи дна и переносится потоком, практически не меняя своей концентрации. Расположение источника примеси вблизи свободной поверхности ведет к лучшему разбавлению рассолов и позволяет уменьшить накопление загрязняющих примесей в придонной области. Этот результат позволяет рекомендовать расположение устройств сброса высокоминерализованных тяжелых рассолов вблизи свободной поверхности как более экологически приемлемое.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Пермского края (проект № 10-01-96060-р_Урал_а) и УрО РАН (Междисциплинарный проект 09-М-15-2002 и Молодежный инновационный проект 2010 г.).

Литература

1. HEC-RAS_4.1_Release_Notes.pdf <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/>
2. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А. Разработка схемы оптимизации использования Юмагузинского и Нугушского гидроузлов // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2009. – № 2. – С. 34-48.
3. Математическое моделирование динамики вод в речных бассейнах, больших озерах и морских заливах. – М.: ВЦ АН СССР, 1988. – 134 с.
4. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Разработка гидродинамической модели для прогнозирования развития и распространения зон загрязнения в бассейне р. Амур // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях. Межд. конф.: Сб. докладов. Москва 3-5 июня 2008г. – С. 138-142.
5. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2007, № 2. – С. 80-93.
6. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика: В 2-х ч. – М.: Наука, 1965. – Ч. 1. – 639 с.
7. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in mathematical models of turbulence. – London; New York: Academic Press, 1972. – 169 p.

Поступила в редакцию 05.05.10

Сведения об авторах

Любимова Татьяна Петровна, дфмн, проф., зав.лаб., Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1; E-mail: lubimova@psu.ru

Лепихин Анатолий Павлович, дгн, проф., зав.лаб., Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78а; E-mail: lepin49@mail.ru

Паршакова Янина Николаевна, кфмн, инж., ИМСС УрО РАН; E-mail: parshakova@icmm.ru

Тиунов Алексей Александрович, мнс, ГИ УрО РАН; E-mail: anywiny@hotmail.com