

УДК 504.4:556.1

***К ПРОБЛЕМЕ ОТВЕДЕНИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ РАССОЛОВ В ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ПРЕДПРИЯТИЯМИ КАЛИЙНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

© 2010 г. А.П. Лепихин¹, Т.П. Любимова², Я.Н. Паршакова²,
А.А. Тиунов³

¹Камский филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Пермь

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

³Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

Ключевые слова: отведение избыточных рассолов калийной промышленности, водные объекты, имитационное моделирование.

Рассмотрены особенности отведения избыточных рассолов в водные объекты предприятиями калийной промышленности на примере Соликамско-Березниковского промузла. Для эффективной оценки возможных схем их регулируемого отведения, в зависимости от гидрологического и гидрохимического режимов водных объектов, разработана и реализована имитационная система моделирования на основе сопряжения гидродинамических моделей в одно-, двух- и трехмерном приближении, учитывающая особенности как водоема-приемника, так и поведения рассолов. Показано, что отведение избыточных рассолов требует очень существенного начального разбавления, в противном случае вследствие больших стратификационных эффектов они могут, практически не разбавляясь, распространяться в придонном слое на очень значительное расстояние.

Постановка задачи

Крупнейшим калийным месторождением России является Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКС), разрабатываемое с XVI в. как месторождение поваренной соли, а с 20-х годов XX в. здесь ведется добыча хлористого калия. Добываемая руда, как правило, представляет собой смесь хлористого калия (сильвина), хлористого магния (карналлита) и хлористого натрия (галита). При этом «полезным компонентом» является хлористый калий. В настоящее время обогащение калийных руд производится, преимущественно, в водной фазе. Сухое обогащение, основанное на использовании метода ESTA (электростатической сепарации), эффективно только при достижении достаточно специфических требований к составу руд.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант 10-01-96060-р_урал_a) и УрО РАН (Междисциплинарный проект 09-М-15-2002 и Молодежный инновационный проект 2010 г.).

Водное хозяйство России № 3, 2010

Водное хозяйство России

При проведении процессов обогащения в водной фазе для растворения 1 т руды требуется около 3 м³ воды. В связи с этим возникает проблема отведения и утилизации избыточных рассолов. В зависимости от географического положения месторождений, горно-геологической структуры месторождений и других факторов, калийные компании различно решают эту проблему. Наиболее просто и эффективно данная проблема решается на месторождениях, расположенных вблизи морских побережий, путем организации морских глубинных водотоков. К сожалению, применительно к условиям Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей, такие схемы нереалистичны, т. к. ближайшее море расположено на расстоянии около 1000 км. В середине 70-х годов XX в. при разработке перспективной генеральной схемы развития системы водоснабжения и водоотведения Соликамско-Березниковского промузла предлагалось для энергообеспечения выпаривания рассолов создание на данной территории двух ядерных реакторов. Однако схема не была реализована и в настоящее время не обсуждается.

Закачка избыточных рассолов в соляные толщи в очень сложных горно-геологических условиях существенно повышает риски как затопления рудников, так и последующей разгрузки рассолов в поверхностные водные объекты. К примеру, в настоящее время повышенная минерализация воды в р. Верра (земли Гессен и Тюрингия, ФРГ) только на 1/3 обусловлена сбросом избыточных рассолов крупной немецкой калийной компании «Kali und Salz AG» (K+S AG), а 2/3 — фильтрационными разгрузками. Закачка в глубокие подсоляные горизонты на глубину примерно 1,5 км, являющаяся основным способом утилизации избыточных рассолов на предприятиях «ПО БеларусьКалий», на рассматриваемом месторождении встречает серьезные трудности из-за расположенных там значительных месторождений нефти.

Поэтому в настоящее время не только в районе ВКМКМС, но и в Европе, несмотря на развитие технологий обогащения и очистки отводимых избыточных рассолов, сброс в поверхностные водные объекты является практически единственным реальным вариантом их утилизации. Так, например, при обсуждении вопроса об отведении рассолов от нового рудника Ellers около г. Фульда (земля Гессен, ФРГ) в р. Верра было проработано 16 сценариев и в качестве единственного приемлемого варианта выбран трубопровод.

В настоящее время в Соликамско-Березниковском промузле сформировалась очень сложная экологическая ситуация, в первую очередь, связанная с загрязнением поверхностных водных объектов. Ее достаточно общая характеристика дается в работе [1]. При этом ситуация усугубляется наличием глубокой зимней межени на водотоках данного района (рис. 1). Поэтому,

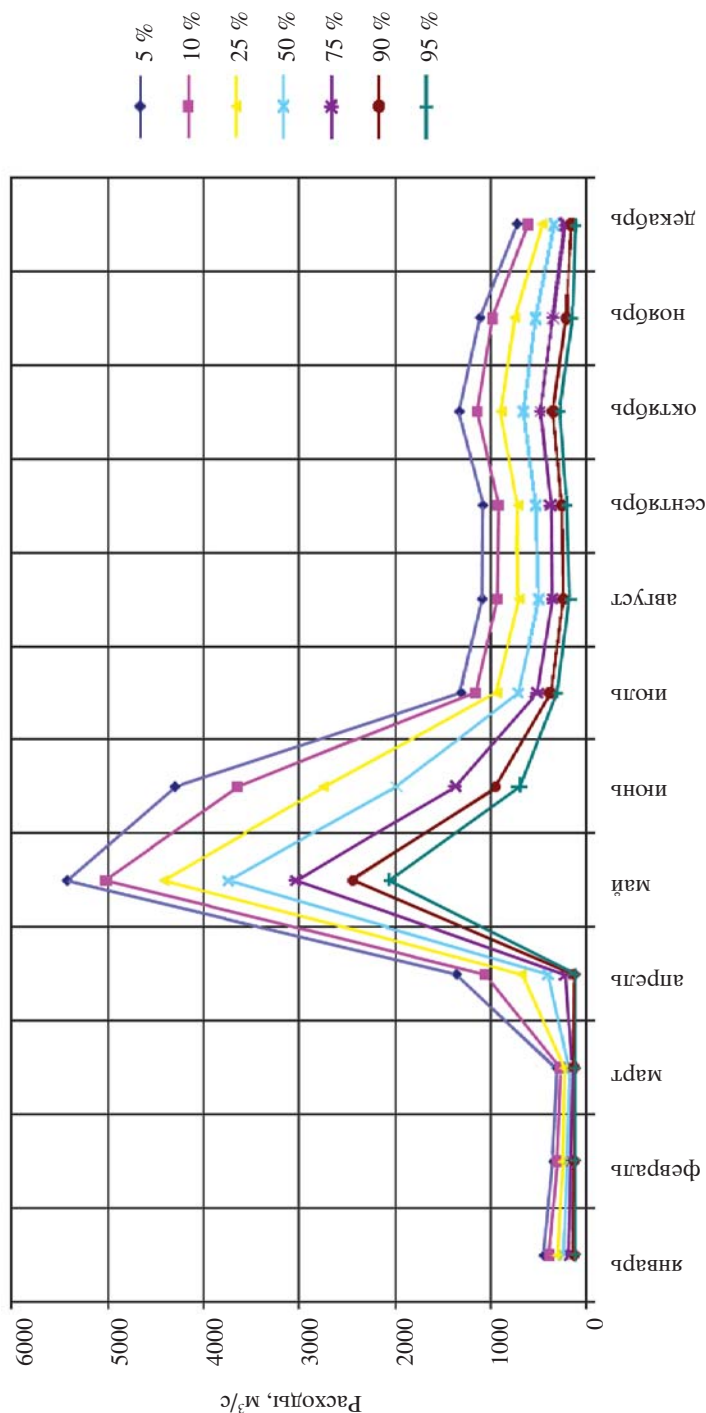


Рис. 1. Внутригодовое распределение среднемесячных расходов воды 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 % обеспеченности, р. Кама — г. Березники.

Таблица. Некоторые статистические характеристики химического состава отводимых рассолов (все размерные величины указаны в мг/л)

Показатели	ПДК _{рх}	ПДК _{хл}	Среднее	Медиана	C_v	C_s	$C_{0,75}$	$C_{0,95}$
Калий K ⁺	50	50	45 348,7	47 600,0	0,340	-0,733	55 200,0	66 400,0
Натрий Na ⁺	120	200	60 136,9	61 040,0	0,043	-0,291	81 250,0	101 000,0
Магний Mg ⁺⁺	40	40	566,9	522,0	0,504	0,533	753,0	1081,0
Кальций Ca ⁺⁺	180	180	1563,4	1580,0	0,331	0,541	1900,0	2273,0
Хлориды Cl ⁻	300	350	142 401,2	143 156,0	0,335	-0,159	178 172,0	214 151,0
Сульфаты SO ₄ ⁻⁻	100	500	5389,5	4820,0	0,520	1,248	6922,0	9618,0
Гидрокарбонаты НСО ₃	—	—	50,4	38,0	1,029	4,304	53,0	130,0
Сухой остаток	1000	1000	261 284,5	268 775,0	0,341	-0,330	335 570,0	386 500,0

Примечания:

- C_v , C_s — коэффициенты вариации и асимметрии, соответственно;
- $C_{0,75}$ и $C_{0,95}$ — квартили случайной величины концентрации загрязняющего вещества, соответственно, порядка 0,75 и 0,95.

для того чтобы существенно снизить нагрузку в маловодный период, необходима синхронизация интенсивности отведения сточных вод с гидрологическим и гидрохимическим режимами водных объектов.

Основными технологическими параметрами при организации сброса сточных вод являются, кроме объема их отведения, содержание загрязняющих веществ. Характеристики химического состава отводимых рассолов приведены в таблице.

Как видно из таблицы, основными лимитирующими показателями отводимых рассолов являются калий и хлориды. При этом для обеспечения в контрольных створах водных объектов нормативных показателей качества воды надежностью 50 % требуется 952-кратное разбавление рассолов, а с гарантией 95 % необходимо 1328-кратное разбавление.

Рассматриваемая синхронизация может достигаться путем использования накопителей, позволяющих проводить сброс сточных вод в зависимости от гидрологического и гидрохимического режима водных объектов, соблюдая выполнение нормативных требований к качеству воды в контрольном створе [2, 3]. 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 оценка надежности в условиях достаточно сложных процессов как стохастической изменчивости стока, так и процессов миграции рассолов в водных объектах. Если

отведение рассолов планируется в относительно небольшой водный объект, то там уже в створе начального разбавления задействуется вся ассимилирующая емкость водотока, поэтому расчет распределения зон загрязнения по акватории водотока не актуален. В то же время при отведении рассолов в очень крупные водные объекты, задача расчета распределения зон загрязнения становится весьма важной.

Методы решения

Учет стохастической изменчивости стока

В качестве возможного водотока (подобно р. Верра в ФРГ), ассимилирующая способность которого при отведении рассолов при определенных условиях может быть использована полностью, выбрана р. Яйва. Ее расход воды по ближайшему к возможному водовыпуску створу — п. Лубнице составляет 90,1 м³/с.

Годовой сток р. Яйва достаточно равномерен в многолетнем разрезе (коэффициент вариации $C_v \sim 0,17$) и в то же время характеризуется существенной внутригодовой изменчивостью. В связи с этим отведение избыточных рассолов в р. Яйва планируется проводить через накопительную емкость, способную аккумулировать более чем годовой объем отводимых стоков. В качестве накопителя рассолов для обеспечения эффективного регулирования сброса целесообразно использовать шламохранилище БКПРУ-4. При этом рассолопровод от БКПРУ-2 до шламохранилища БКПРУ-4 будет работать в реверсном режиме. То есть в зимний межень период производится закачка рассолов в шламохранилище БКПРУ-4, а во время прохождения половодья они отводятся непосредственно в р. Яйва.

Лимитирующим показателем качества воды в контрольном створе водотока выбрано содержание хлоридов. Для оценки вероятностей возможных превышений этим показателем допустимых уровней (ПДК) применялись схемы стохастического моделирования. Используя традиционную схему простой цепи Маркова, моделировались среднегодовые значения расходов воды. Принимая для контрольного створа условия полного перемещения, а для фонового створа — зависимость содержания хлоридов C_{ϕ} от расхода водотока Q — $C_{\phi}(Q) = f(Q)$, проводилось моделирование концентраций рассматриваемых показателей в контрольном створе. Результаты модельных расчетов при различных годовых объемах сбросов рассолов представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, при объемах сброса 1,5 млн м³/год вероятность превышений нормативных значений содержания хлоридов при полном

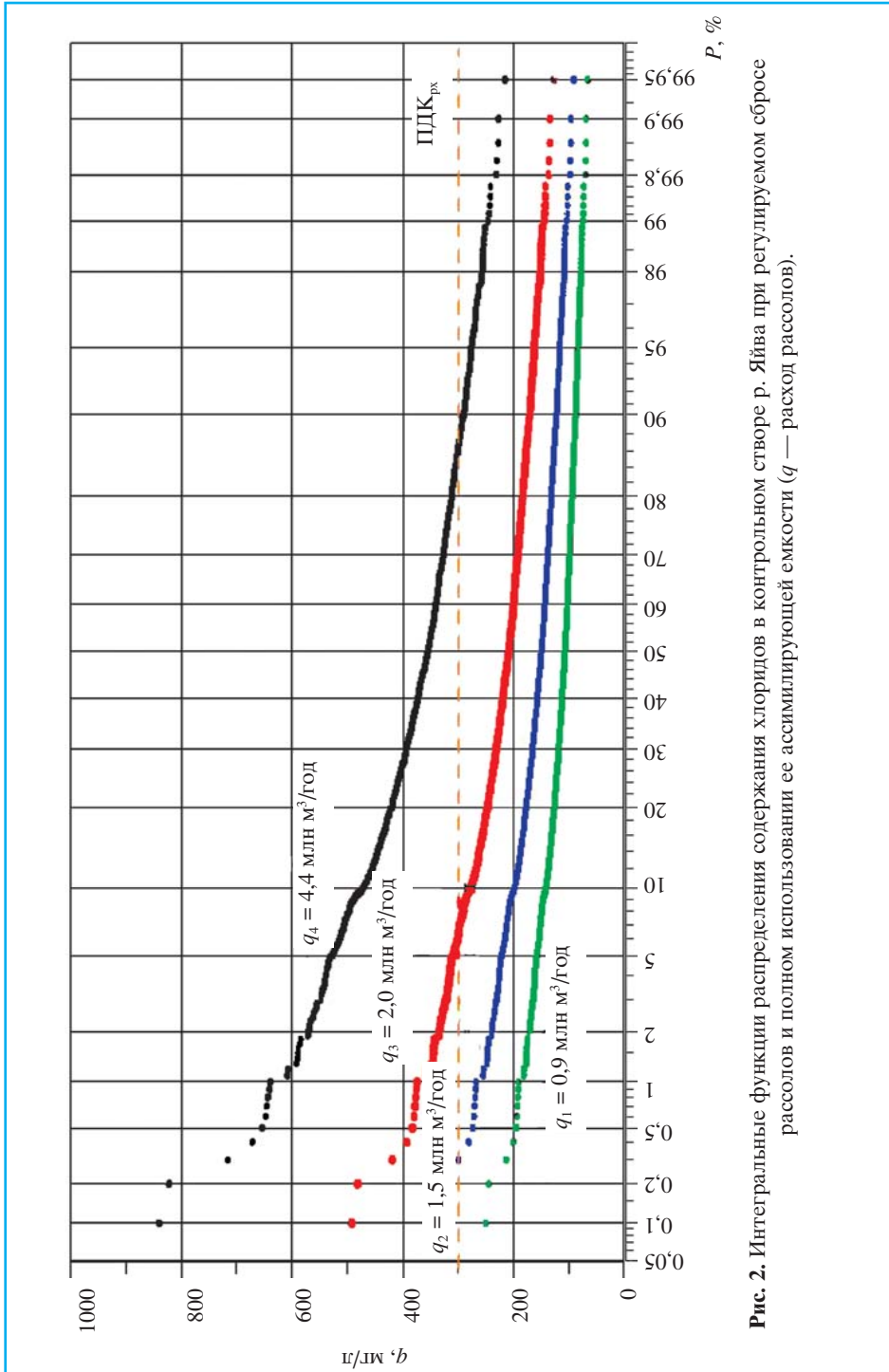


Рис. 2. Интегральные функции распределения содержания хлоридов в контрольном створе р. Яйва при регулируемом сбросе рассолов и полном использовании ее ассимилирующей емкости (q — расход рассолов).

использовании ассимилирующей способности водотока составляет менее 1 %. В то же время при сбросе всего требуемого объема отводимых рассолов 4,4 млн м³/год содержание хлоридов не будет с надежностью 99 % превышать 600 мг/л, т. е. двукратного превышения ПДК. Как уже отмечалось выше, при сбросе рассолов в р. Верра компанией K+S AG, действует норматив 2500 мг/л.

Таким образом, из общего объема требуемых отводимых избыточных рассолов ОАО «Уралкалий» 4,4 млн м³/год примерно 1,5 млн м³/год могут сбрасываться в р. Яйва, оставшиеся 2,9 млн м³/год могут быть сокращены путем применения новых схем обогащения или закачкой в подземные горизонты. В этом отношении может быть интересен опыт упомянутой выше компании K+S AG, когда в результате применения технологии сухой сепарации ESTA, удалось сократить закачку рассолов в размере скачка от 21,5 млн м³ в 1980 г. до 8 млн м³ в 1998 г.

Основными преимуществами реализации данной схемы будут:

- выполнение всех действующих требований водного законодательства;
- полное прекращение сброса рассолов непосредственно в р. Кама;
- значительное снижение и в дальнейшем полное прекращение фильтрационной разгрузки рассолов в р. Ленва из шламохранилища БКПРУ-2 и БКПРУ-3;
- зона повышенной концентрации в водотоке-приемнике не будет превышать 100 м во всех рассматриваемых схемах отведения;
- отсутствие ухудшений условий водопользования в населенных пунктах, расположенных ниже по течению.

В то же время данная схема имеет существенный недостаток: рассеивающий оголовок для обеспечения эффективного смешения практически должен занимать всю ширину водотока, что существенно затрудняет миграцию рыб, в то время как нижнее течение р. Яйва на протяжении 8 км до устья является рыбопромышленным участком (налим, судак). В связи с этим режим сброса должен устанавливается не только в зависимости от расхода р. Яйва и содержания в ней основных макрокомпонентов в фоновом створе, но и по согласованию с рыбоохранными организациями с учетом миграции промысловых рыб.

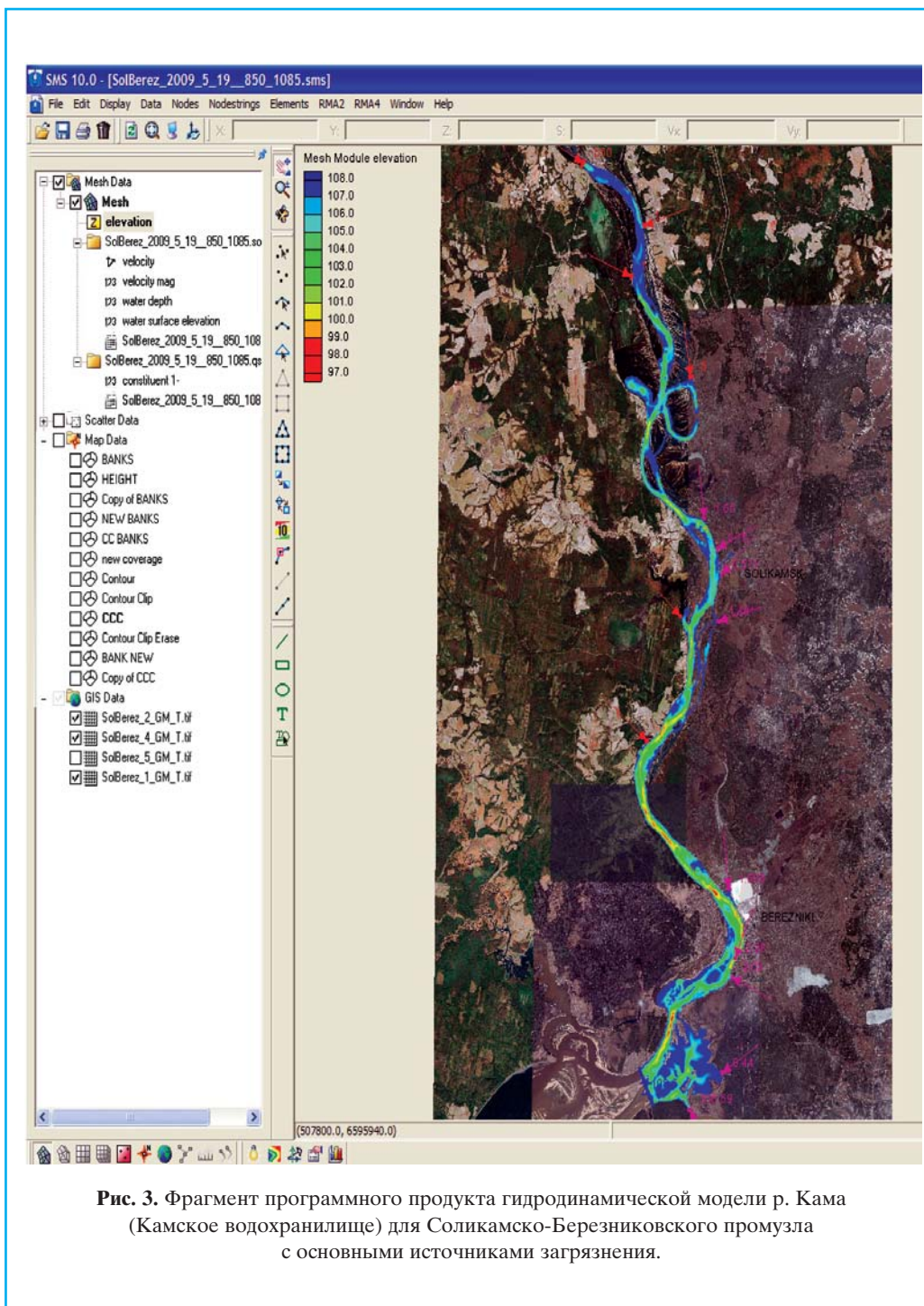
Модели разбавления

Для того чтобы рассматриваемые модели разбавления были достаточно эффективны, они должны учитывать характерные особенности не только водных объектов, но и самих отводимых стоков. Учитывая, что р. Кама в районе Соликамско-Березниковского промузла имеет

весьма сложный гидрологический режим, являясь зоной переменного подпора от Камской ГЭС, а отводимые рассолы характеризуются высокой плотностью, существенно превышающей плотность пресной воды, была принята и построена трехуровневая система моделирования рассматриваемых процессов.

Первый уровень составляет гидродинамическая модель, построенная на основе системы уравнений Сен-Венана в одномерной постановке для участка протяженностью 350 км, охватывающего все Камское водохранилище от п. Тюлькино до Камской ГЭС. Для ее численного решения используется программный продукт HEC-RAS v. 4 [4], особенности применения которого при решении конкретных водохозяйственных задач даются в работе [5]. В качестве начального условия при использовании модели принимаются расходы воды в верхнем створе р. Кама — п. Тюлькино, а также расходы воды по основным наиболее крупным притокам — рекам Яйва, Косьва, Иньва, Обва, Чусовая, Сылва. В качестве граничного условия задается уровень воды (и/или расход воды) в верхнем бьефе Камской ГЭС. В результате расчета получаем распределение гидравлических характеристик потока для всей расчетной области. По результатам использования одномерной гидродинамической модели производится оценка начальных и граничных условий для модели второго уровня.

В основу модели второго уровня положена хорошо исследованная система уравнений мелкой воды, включающая систему уравнений количества движения мелкой воды и уравнение неразрывности в двухмерной постановке. Для численного решения рассматриваемой системы уравнений использовался лицензионный программный продукт SMS v.10 (Surface-water Modeling System) [6]. Достаточно детальное описание рассматриваемого программного продукта и опыт его использования для решения конкретных водохозяйственных задач на водных объектах (реках Амур и Сылва) дается в работах [7, 8]. В качестве начальных условий для данного гидродинамического блока приняты расход воды на верхнем створе и уровень воды на нижнем створе. Морфометрия расчетной области определена на основе [9] с учетом материалов собственных детальных батиметрических съемок. Данная модель разработана для верхней части Камского водохранилища и включает все основные источники поступления загрязняющих веществ от водопользователей Соликамско-Березниковского промузла (рис. 3). Характерной особенностью рассматриваемого водного объекта является его очень сложная морфометрия. Для адекватного ее задания расчетная сетка включает более 40 000 элементов. При моделировании процессов переноса загрязняющих веществ в качестве исходных данных используются расход



сбрасываемых стоков и содержание в них загрязняющих веществ. В то же время сами расчетные параметры, в первую очередь, характеристики поля скорости, получаемые на основе данной модели второго уровня, определяют граничные условия для модели третьего уровня.

Модельные расчеты распространения возможных зон загрязнений от различных водовыпусков проводились для р. Кама (Камское водохранилище) при следующих характерных гидрологических условиях:

- расход в верхнем створе р. Кама — п. Тюлькино — 850 м³/с;
- на нижней границе расчетной области уровень воды поддерживается на отметке НПП — 108,5 м.

Расчетные характеристики распределения поля скоростей течения для принятых начальных и граничных условий представлены на рис. 4. Из рис. 4 следует, что распределение поля скорости существенно неоднородно по акватории водного объекта, при этом зона повышенных скоростей смещается от левого берега к правому, что, безусловно, влияет на распределение загрязняющих веществ.

Основным источником загрязнения р. Кама (Камское водохранилище) является станция перекачки г. Березники, через которую поступает более 70 % от общего объема отводимых загрязняющих веществ в водные объекты в масштабе Соликамско-Березниковского промузла или около 50 % в масштабе Пермского края. Распределение зон загрязнения от данного источника загрязнения при штилевых условиях представлено на рис. 5. На рис. 5 видно, что загрязненная струя также смещается от левого берега к правому, т. е. наибольшее загрязнение при штилевых условиях угрожает населенным пунктам, расположенным на правом берегу водохранилища (пос. Огурдино, Орел).

Если в качестве основного приемника сточных вод будет использоваться р. Яйва, зона повышенного содержания макрокомпонентов (загрязняющих веществ, концентрации которых приняты в качестве лимитирующих показателей качества воды на данном участке) в р. Кама (Камское водохранилище) будет локальна и проходить вдоль левого берега вне селитебных зон (рис. 6). Таким образом, существующая и предлагаемая схемы отведения сточных вод характеризуются различной структурой воздействия на водный объект. Отведение рассолов через р. Яйва характеризуется значительно меньшим воздействием на селитебные зоны.

В общем случае использование моделей переноса в двумерном приближении достаточно корректно при условии, что сбрасываемые сточные воды не формируют в водных объектах значительные области с существенной плотностной стратификацией. В противном случае необходимо использовать модели переноса в трехмерном приближении, что со-

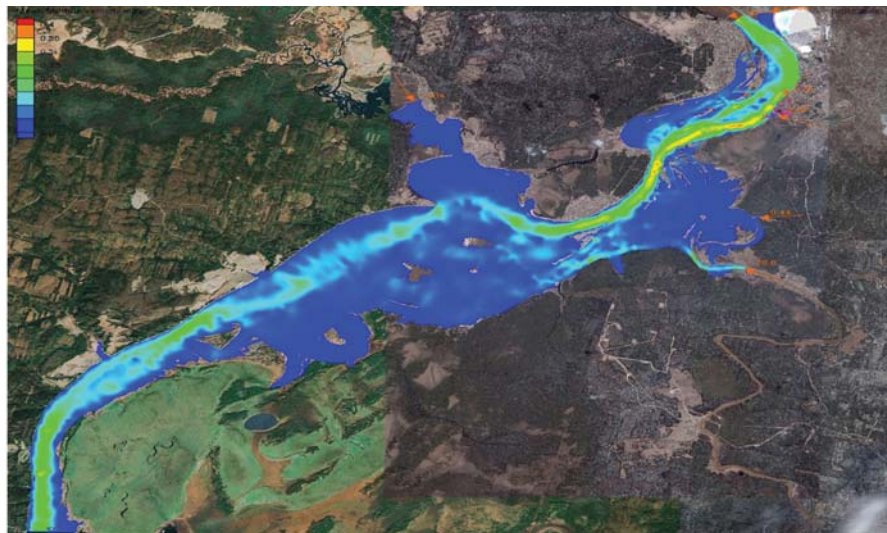


Рис. 4. Картограмма распределения скоростей течения на расчетном участке.

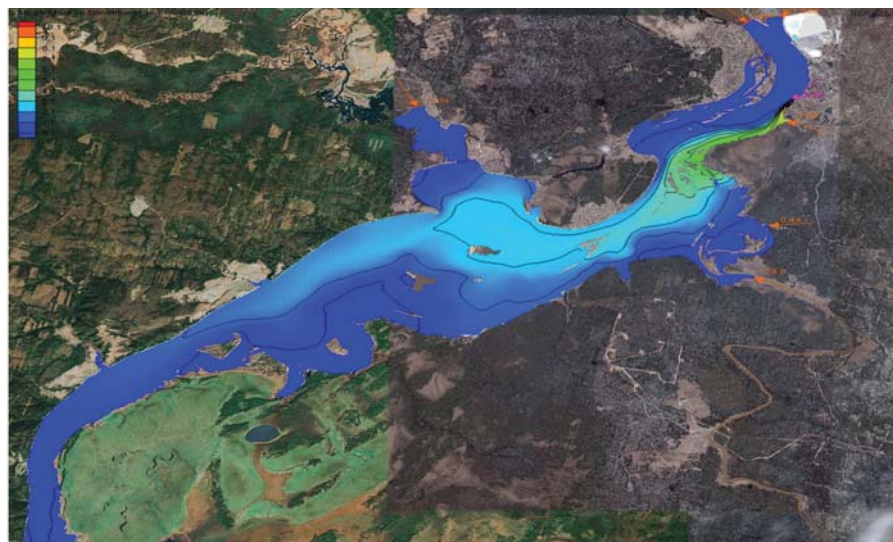


Рис. 5. Картограмма распределения относительной концентрации загрязняющих веществ на расчетном участке при их поступлении через станцию перекачки г. Березники.

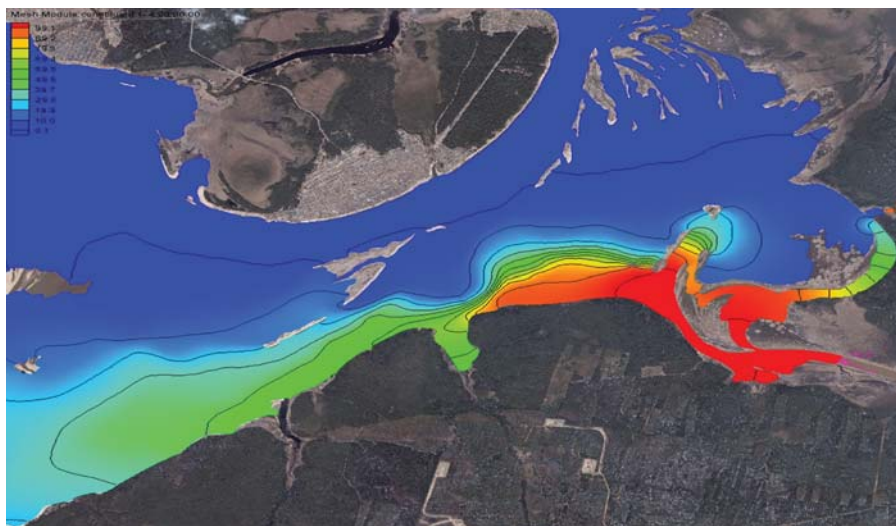


Рис. 6. Картограмма распределения относительной концентрации хлоридов при поступлении избыточных рассолов через р. Яйва.

ответствует третьему уровню системы моделирования рассматриваемых процессов. Эти модели из-за своей значительно большей сложности существенно реже применяются при решении задач оценки техногенных воздействий на водные объекты.

Модели переноса рассолов в трехмерном приближении

Характерной особенностью отводимых избыточных рассолов является их очень значительная минерализация (~ 300 г/л) и, соответственно, высокая плотность ($\rho \sim 1,2$ г/л). «Тяжелые» рассолы из-за подавления вертикальных турбулентных пульсаций могут распространяться на значительные расстояния, не снижая заметно концентрации. Для изучения влияния плотностной стратификации на процессы разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов проведено моделирование в рамках трехмерного подхода. Рассматривался сброс отработанной соленой воды из щели, расположенной на дне поперек русла реки.

Расчеты проводились с использованием коммерческого пакета Fluent 6.3.26, реализующего метод конечных объемов. Использовалась $k - \epsilon$ модель турбулентности. В уравнениях для турбулентной кинетической энергии и ее диссипации учитывался вклад эффектов плотностной стратификации.

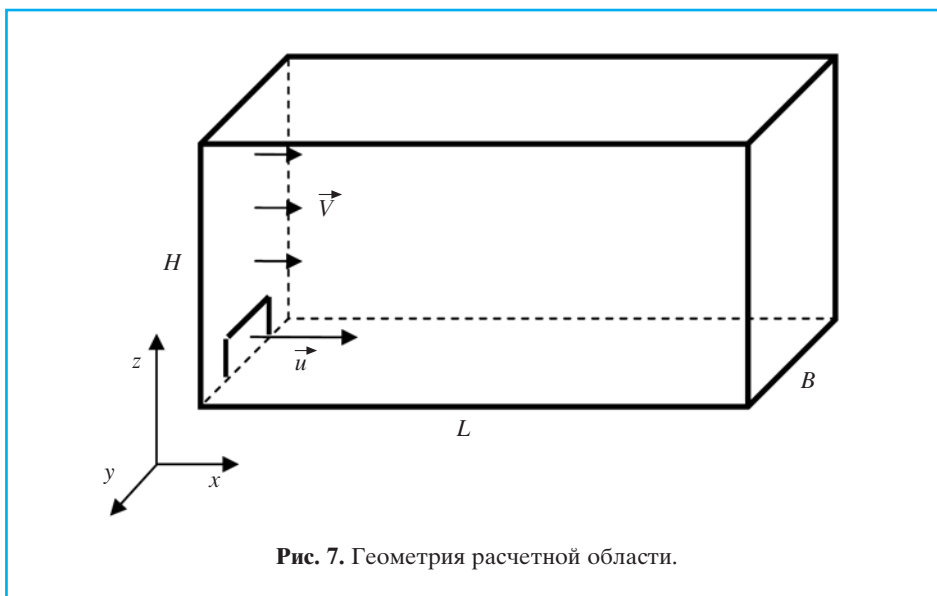


Рис. 7. Геометрия расчетной области.

Расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед, содержащий один источник в виде прямоугольной щели высотой $h = 0,5$ м и шириной $l = 5$ м, располагающейся у дна, посередине расчетной области относительно боковых стенок (рис. 7). Высота расчетной области $H = 10$ м, ширина $B = 15$ м, длина $L = 300$ м.

На нижней границе расчетной области, соответствующей дну, ставились условия прилипания и отсутствия потока примеси. 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.

Остальные параметры модели задавались следующим образом: на входе расчетной области — постоянная скорость основного потока, имеющая одну ненулевую компоненту, и постоянная концентрация, равная фоновой концентрации примеси в реке; на выходе — «мягкие» граничные условия обращения в нуль производных по x от всех полевых функций; на выпускном отверстии — постоянные скорость вытекания рассола и концентрация примеси; на боковых границах расчетной области — условия равенства нулю производной скорости по нормали и отсутствия потока примеси.

Рассматривалась квадратичная зависимость плотности от концентрации, построенная применительно к рассолам калийных предприятий ВКМКС [10], $\rho = \rho_0 + A \cdot c + B \cdot c^2$ ($\rho_0 = 999,993$; $A = 667,8$; c — минерали-

зация рассолов в г/л), при этом изменения плотности по глубине достигали 10 %. В качестве начального состояния задавались распределенная однородно фоновая концентрация примеси и скорость основного течения, равная скорости на входе расчетной области.

Вычисления проводились в рамках нестационарного подхода.

Сетка строилась с помощью программы Gambit 2.4.16, при этом расчетная область разбивалась на ячейки со сгущением вблизи выпускного отверстия. Основные расчеты проведены с использованием сетки, состоящей примерно из $4 \cdot 10^5$ элементов.

На рис. 8—9 приведены результаты расчетов для скорости выпуска рассола $u = 4$ м/с, скорости основного течения $v = 0,1$ м/с, концентрации соли в отработанной воде 300 г/л и фоновой концентрации соли в воде 0,3 г/л.

На рис. 8 представлено поле концентрации примеси в вертикальном сечении $y = 7,5$. Вычисления показали, что на расстоянии 40 м от источника примеси концентрация примеси уменьшается на 25 %. Как видно из рис. 8, при дальнейшем удалении от источника концентрация соли практически не меняется. Возникает запирающий слой, внутри которого энергия турбулентных пульсаций близка к нулю. Внутри этого слоя рассол, практически не разбавляясь, перемещается по водному объекту в узком придонном слое.

Эти выводы иллюстрируются также рис. 9, на котором приведены распределения относительной концентрации примеси по вертикали на расстояниях 150 и 300 м от щели.

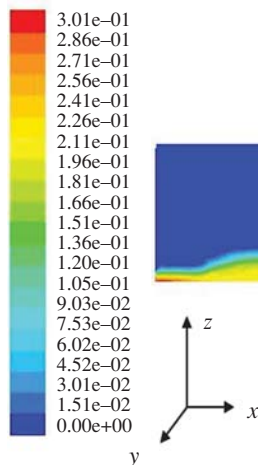


Рис. 8. Поле концентрации в плоскости сечения $y = 7,5$ (масштаб вертикального и горизонтального размеров соотносится как 1:5).

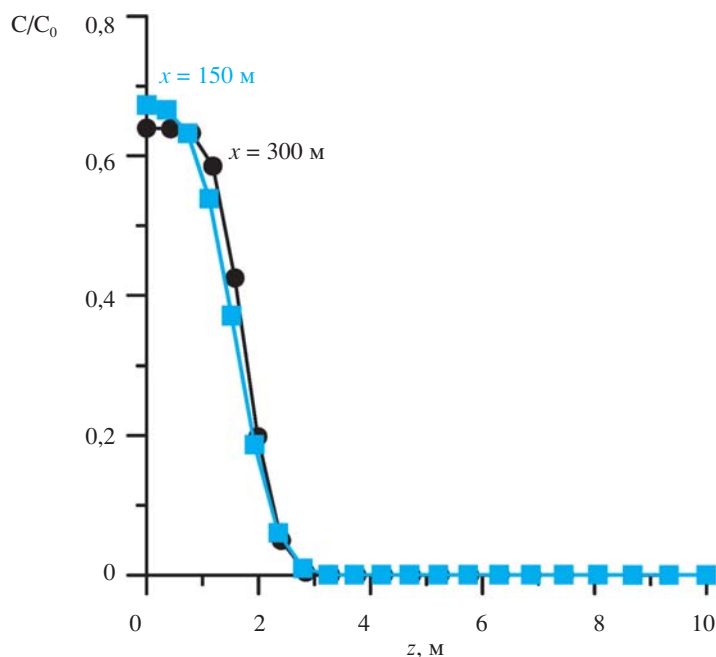


Рис. 9. Зависимости относительной концентрации от вертикальной координаты на расстояниях 150 м и 300 м от выпускного отверстия (щели).
Начальная концентрация $C_0 = 300$ г/л, скорость сброса $u = 4$ м/с,
скорость основного потока $v = 0,1$ м/с.

Исходя из рассмотренных «плотностных» эффектов, традиционные схемы организации рассеивающих водовыпусков [11] в данном случае совершенно некорректны. Необходимо использовать поверхностные водовыпуски с максимально полным начальным разбавлением. Зависимость кратности начального разбавления от протяженности активной зоны рассеивающего водовыпуска дается на рис. 10. При этом их конструктивные решения, применительно к рассматриваемой задаче, должны отрабатываться на имитационных моделях в трехмерной постановке.

В то же время, чем больше протяженность активной зоны, тем наблюдается относительно более медленное снижение загрязнения в результате основного разбавления (рис. 11).

Поэтому при выборе оптимального размера активной зоны рассеивающего водовыпуска необходимо учитывать комплекс как экологических, так и технологических факторов.

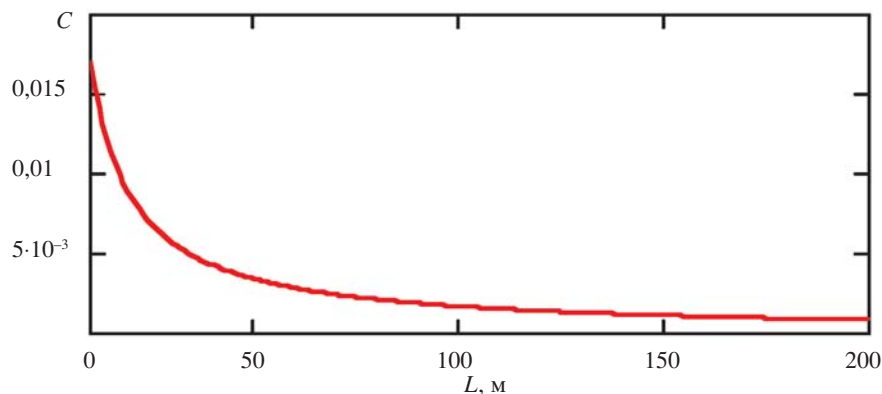


Рис. 10. Зависимость относительной концентрации загрязняющих веществ $1/n$ (n -кратность разбавления) в створе начального разбавления от протяженности активной части рассеивающего водовыпуска.

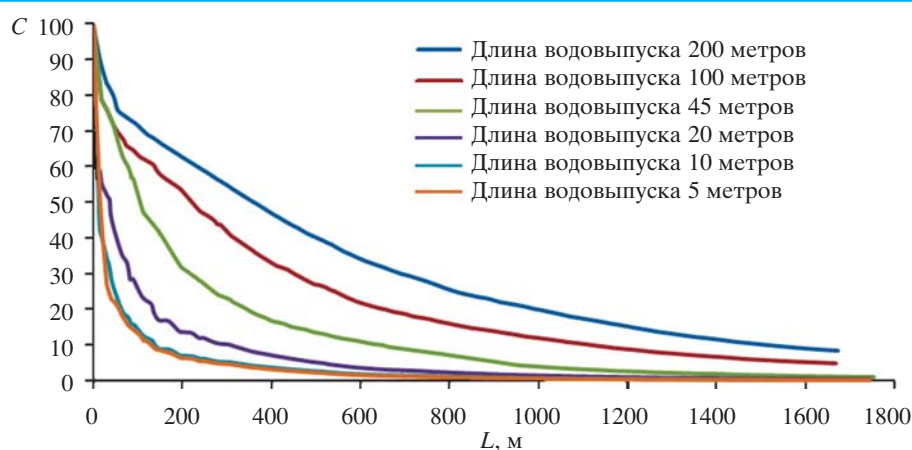


Рис. 11. Зависимость снижения относительных максимальных концентраций хлоридов от расстояния до рассеивающего водовыпуска при различной ширине.

Выводы

1. Регулируемый в зависимости от гидрологического и гидрохимического режима водотоков-приемников сброс рассолов позволяет значительно более полно использовать их ассимилирующий потенциал. В качестве накопительной емкости для обеспечения регулируемого сброса наиболее эффективно использовать шламохранилище БКРУ-4.

2. Процессы смешения рассолов в силу их высокой плотности при их поступлении в водные объекты существенно отличаются от поведения

сточных вод с плотностью $\rho \approx 1 \text{ кг/дм}^3$, поэтому необходимо учитывать существующую неоднородность химического состава вод по глубине потока. При этом традиционные системы организации рассеивающих водовыпусков требуют значительной корректировки. Отработку наиболее эффективных для данных конкретных рассматриваемых условий конструктивных особенностей рассеивающих водовыпусков целесообразно проводить на основе использования трехмерного имитационного гидродинамического моделирования.

3. В качестве рабочего инструмента для оценки эффективности различных схем отведения рассолов была разработана комплексная гидродинамическая модель р. Кама (Камское водохранилище), основанная на сочетании одно-, двух- и трехмерного описания. Вблизи выпусков рассолов расчет проводится в рамках трехмерного моделирования с учетом существенной неоднородности рассчитанных параметров по глубине потока. На более значимых расстояниях, когда концентрация загрязняющих ингредиентов выравнивается по глубине, наиболее эффективно использовать модели в двухмерном приближении. В то же время результаты моделирования в двухмерном приближении определяют начальные и граничные условия для модели в трехмерном приближении. В свою очередь, начальные и граничные условия для модели в двухмерном приближении определяются на основе модельных расчетов в рамках одномерного приближения. Так как данная модель построена для всего Камского водохранилища, начальные условия для нее определяются по створу п. Тюлькино (верхний створ водохранилища), а на нижней границе задаются режимом работы Камской ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А. Техногенные воздействия Соликамско-Березниковского промузла на водные объекты // Горный журнал. 2008. № 10. С. 92—96.
2. Пleshков Я.Ф., Мухомад В.И. Вопросы инженерной гидрохимии и охраны вод. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 175 с.
3. Лепихин А.П., Вагнер Н.В., Панькова О.И. Гидрологические аспекты организации регулируемого сброса сточных вод в водотоки (на примере БКРУ-4 г. Березники) // Водное хозяйство России. 2003. № 4. С. 303—313.
4. HEC-RAS River Analysis System / Users manual, 2008.
5. Перепелица Д.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Разработка схемы оптимизации использования Юмагузинского и Нугушского гидроузлов // Водное хозяйство России. 2009. № 2. С. 34—48.
6. SMS. TUTORIALS. Version 9.2. Brigham Young University — Environmental Modeling Research Laboratory. October 13, 2006.
7. 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 : Междунар. конф.: Сб. докл. Москва 3—5 июня 2008 г. С. 138—142.
8. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А., Богомолов А.В. Особенности влияния объектов нефтедобычи на экологическое состояние озера Нюхти // Водное хозяйство России. 2009. № 5. С. 76—98.
 9. Атлас единой глубоководной системы Европейской части Российской Федерации. Т. 9. Река Кама от поселка Керчевский до города Чайковский. Ч. I. СПб.: ОАО «Иван Федоров», 2000. 54 с.
 10. Вострецов С.П. Расчет физических характеристик рассолов, соленых суспензий и грунтов // Горный журнал. 2008. № 10. С. 48—51.
 11. Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод. М.: Стройиздат, 1981. 224 с.

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д. г. н., профессор, директор Камского филиала ФГУП РосНИИВХ, 614007, г. Пермь, ул. Народовольческая 33; e-mail: lepin49@mail.ru;

Любимова Татьяна Петровна, д. ф.-м. н., профессор, заведующая лабораторией вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: lyubimovat@mail.ru;

Паршакова Янина Николаевна, к. ф.-м. н., инженер лаборатории вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: gadiyatova@mail.ru;

Тиунов Алексей Александрович, аспирант Горного института УрО РАН, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com.