

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

*К 90-летию БНТУ*

**Республиканский межведомственный  
сборник научных трудов**

**ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО  
И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**Минск 2010**

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО  
Республиканский межведомственный сборник научных трудов

Основан в 1971 году

*Выпуск 22*

Минск 2010

~~УДК 626/628 (476) (06)~~

~~ББК 31.5я43~~

В 62

### Редакционная коллегия

Г.Г. Круглов (гл. редактор), С.П. Гатилло (отв. секретарь),  
Э.П. Коваленко, Д.А. Козлов, А.Н. Колобаев, В.М. Масюк,  
Э.И. Михневич, Г.А. Щербаков (зам.гл. редактора)

Рассматриваются проблемы водохозяйственного строительства Республики Беларусь. Разрабатываются методы расчета гидросооружений и дренажей, исследуется влияние окружающей среды на малые реки, водохранилища и подземные воды. Предлагаются мероприятия по очистке производственных стоков, изучаются физические свойства грунтов.

Материалы сборника прошли рецензирование.

Рассчитан на специалистов в области использования и охраны водных ресурсов.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Богославчик П.М. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В БНТУ.....	6
Красуцкий А.А., Сидорович Б.А. АВТОРИТЕТ УКРЕПЛЯЕМ ДЕЛАМИ .....	12
Рогуневич В.П. ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА В СЛОЖНЫХ БАССЕЙНАХ РЕК.....	17
Говоровский Б.И., Корбут О.Б. СУДОХОДНЫЕ ШЛЮЗЫ В БЕЛАРУСИ – НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ.....	26
Смирнов А.И., Гатилло С.П. НОВЫЙ ЭТАП ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ГЭС В БЕЛАРУСИ .....	31
Круглов Г.Г., Линкевич Н.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСБРОСНОГО СООРУЖЕНИЯ ПОЛОЦКОЙ ГЭС.....	35
Линкевич Н.Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛО-НОСИТЕЛЯ ВДОЛЬ КОЛЛЕКТОРА С РАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧЕЙ РАСХОДА ПО ДЛИНЕ.....	47
Соколовский Г.В., Селезнев В.И., Линкевич Н.Н., Высоченко А.В., Капилевич Ж.А. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОСУЩЕНИЮ ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ Понижений ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕМЛЯХ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ.....	53
Коревицкий Г.А., Моргунов С.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОСЛИВА КРИВОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ.....	71
Сапожников Е.Г., Анорну Квами Джофрей. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ДРЕНАЖНОЙ СКВАЖИНЫ ДЛЯ ПЕРЕХВАТА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ СТОКОВ, ПРОФИЛЬТРОВАВШИХСЯ ИЗ ХРАНИЛИЩА (ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ).....	79
Минчукова М.Е., Круглов Г.Г. ПОЛИМЕРНЫЕ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	87

Валуев В.Е., Волчек А.А., Мешик О.П., Цилиндь В.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОСТИ КОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....	96
Валуев В.Е., Волчек А.А., Лукша В.В., Мешик О.П., Цилиндь В.Ю. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ.....	108
Валуев В.Е., Волчек А.А., Мешик О.П., Цилиндь В.Ю. ВНУТРИГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ.....	117
Дубенок С.А., Колобаев А.Н., Минченко Е.М. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	125
Карпенчук И.В., Короткий В.Н. МЕХАНИКА НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕГАЗОВОГО ПОТОКА В ПОРОВОЙ ТРУБКЕ ЗЕРНИСТОГО ФИЛЬТРА.....	134
Карпенчук И.В. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРА-МЕТРОВ КАВИТАЦИОННЫХ ЭЖЕКТОРОВ-СМЕСИТЕЛЕЙ.....	140
Яромский В.Н. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУЛЬСАЦИОННЫХ БИОРЕАКТОРОВ НА ОБЪЕМНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПЕРЕДАЧИ.....	146
Яромский В.Н., Яковчиц М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИОННОГО БИОРЕАКТОРА .....	1566
Яромский В.Н. КОМБИНИРОВАННЫЕ СООРУЖЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	165
Ивашечкин В.В. РЕГЕНЕРАЦИЯ СКВАЖИННЫХ ФИЛЬТРОВ С ПОМОЩЬЮ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ.....	173
Ивашечкин В.В. РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН ВЗРЫВОМ ХЛОР-ВОДОРОДНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ... ..	185
Козицин Т.В. СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОДО-ПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ .....	195
Пахомов А.В. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНА.....	203

Равовой П.У. РОЛЬ А.Н. КОЗЛОВСКОГО ПО ВНЕДРЕНИЮ ДРЕНАЖА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ.....	208
Костюкович П.Н., Крошнер И.П. ВЛИЯНИЕ СТЕСНЕННОЙ ДИЛАТАНСИИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫПУЧИХ И СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ.....	214
Воронин А.Г. ТЕХНОЛОГИЯ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОКОМБИНАТОВ ОТ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	221
Крошнер И.П. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ФАЗОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛИНЕЙНОЙ ФАЗОВОЙ МОДЕЛИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ .....	225
Шнипов Ф.Д. К ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЕЛ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ .....	234
Ларьков В.В. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ОБЪЕМНО-ФИЛЬТРУЮЩИХ ОТСТОЙНИКОВ .....	238
Ларьков В.М. ВОДОСЛИВНАЯ ПЛОТИНА С РЕШЕТЧАТЫМ ВОДОСЛИВОМ НА р. БЫСТРАЯ (20 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ).....	246
Повколас К.Э. ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ПЕСКОВ КОНТАКТНОМУ СДВИГУ .....	254
Корбут О.Б., Хусейн Сафаа. ВОЗМОЖНОСТЬ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЛОКАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ.....	260

П.М. Богославчик (БНТУ)

**ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В БНТУ**

2010-й год юбилейный для Белорусского национального технического университета, известного до 1991 года как Белорусский политехнический институт (БПИ), затем как Белорусская государственная политехническая академия (БГПА). Нынешнее свое название БНТУ носит с апреля 2002 года. Сегодня это ведущий технический вуз Республики Беларусь и стран СНГ. История университета берет начало с 10 декабря 1920 года. Именно в этот день решением тогдашнего правительства БССР Минское политехническое училище типа «Техникум» было преобразовано в высшее техническое учебное заведение «Белорусский государственный Политехникум», имеющим целью готовить инженерных кадров с высшим образованием «по главным производствам Белоруссии». Среди пяти факультетов института был культурно-технический факультет, на котором две кафедры «Гидротехнические и гидромелиоративные работы» и «Гидравлика» начали подготовку инженерных кадров по специальности «Гидротехнические и гидромелиоративные работы». Таким образом, начало истории БНТУ является днем рождения высшего гидротехнического образования в этом вузе. В первом, 1920/1921 учебном году в политехническом институте занималось всего 305 студентов, из них 40 на культурно-техническом факультете. Но уже в 1921 году на первый курс института было принято 605 студентов.

Годы создания «Политеха» совпали с годами тяжелого экономического положения в стране. Не хватало средств. Промышленность была разрушена. Поэтому в 1922 году Белорусский политехнический институт был реорганизован и на его базе были созданы Белорусский государственный институт сельского хозяйства и ряд техникумов, из которых впоследствии образовались отраслевые институты.

В 1930 году правительство Советской Белоруссии решило вновь открыть политехнический институт, который начал функционировать с 1933 года. И вновь специалисты водного хозяйства оказались востребованы. Среди четырех факультетов, входящих в институт,

был создан торфомелиоративный факультет, организатором и первым деканом которого был М.В. Дорошевич, впоследствии ректор института, а затем Министр высшего и среднего специального образования БССР. Факультет состоял из 3 отделений: гидромелиоративного, торфо-эксплуатационного и торфомеханического. Гидромелиоративное отделение в первые годы насчитывало 125 студентов. Основное ядро научно-педагогических кадров факультета составляли: профессора М.В. Дорошевич, А.А. Кравцов, доценты С.П. Михайлов, П.И. Кудрявцев, И.М. Лившиц. В 1935-1936 гг. начали работать на факультете профессор О.С. Шестопал и доцент Я.Т. Ковалев. Лекции по специальным дисциплинам читали академик АН БССР, профессор Г.И. Ануфриев, член корреспондент АН БССР, профессор И.Г. Блох. Учебно-лабораторная база факультета в первое время состояла из одной гидравлической лаборатории и трех кабинетов: гидротехнических мелиораций, эксплуатации торфяных залежей и геодезии.

В 1939 году Всесоюзным комитетом по делам высшей школы при СНК СССР был утвержден Устав Белорусского политехнического института. Согласно Уставу Белорусский политехнический институт имел четыре факультета и продолжал готовить инженеров по семи специальностям, в том числе по специальности «Гидротехнические и гидромелиоративные сооружения» на торфомеханическом и гидромелиоративном факультете.

Гидротехническое и гидромелиоративное строительство в Беларуси в довоенные годы развивалось достаточно интенсивно. Стране требовались инженерные кадры. Поэтому соответственно развивался и укреплялся торфомелиоративный факультет. К 1941 г. он имел достаточное количество высококвалифицированных научно-педагогических работников и хорошо оснащенную учебно-лабораторную базу. Выросло количество студентов. За довоенный период здесь было подготовлено свыше 500 инженеров-гидротехников.

В период временной оккупации Белоруссии немецко-фашистскими захватчиками лаборатории и кабинеты факультета, как и весь институт, были разгромлены и уничтожены. Но уже 20 сентября 1944 г. СНК БССР принимает постановление «О возобновлении деятельности Белорусского государственного политехнического института». 1 марта 1945 г. начались занятия. Подготовка

инженерных кадров велась по восьми специальностям, в том числе по специальности «Гидромелиорация».

12 марта 1949 г. Министерство высшего и среднего специального образования приняло решение о создании в Белорусском политехническом институте торфяного факультета. В связи с этим решением торфомелиоративный факультет был разделен на два факультета: торфяной и гидротехнический. Деканом гидротехнического факультета был избран А.Ф. Анищенко. В составе гидротехнического факультета были утверждены три специальности: «гидротехническое строительство», «механизация гидромелиоративных работ», «гидротехнические мелиорации». В 1949 году последняя специальность была передана в Белорусскую сельскохозяйственную академию, в составе факультета остались две специальности.

В 1952 г. в связи с развернувшимся в СССР крупным гидротехническим строительством на гидротехнический факультет был значительно увеличен прием студентов, в результате чего общее количество их на факультете достигло 500, т.е. выросло по сравнению с довоенным периодом в три с лишним раза. Факультет стал готовить кадры гидротехников не только для БССР, но и для крупнейших гидротехнических строек СССР.

С 1952 г. факультет готовит инженеров по трем специальностям: «строительство речных гидротехнических сооружений», «строительство ГЭС», «механизация гидромелиоративных работ». В 1955 году на факультете начата подготовка инженерных кадров по специальности «Водоснабжение и канализация». Эта специальность была открыта еще в 1933 году на строительном факультете, но тогда она, просуществовав всего два года, в 1935 году она была сокращена. В 1958 году для подготовки инженеров по данной специальности на базе кафедры «Гидрология и водоснабжение» была создана кафедра «Водоснабжение и канализация», которая в настоящее время называется «Водоснабжение и водоотведение».

В 50-е годы на гидротехническом факультете получила бурное развитие научная деятельность. Профилирующие кафедры усовершенствовали методы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации водохозяйственных систем и гидротехнических сооружений в условиях Беларуси. Это научное направление возглавлял профессор Ф.П. Винокуров (впоследствии академик АН БССР).

Кафедра гидротехнического строительства проводила исследования для Витебской ГЭС, по способам укрепления берегов Днепробугского канала и судоходных рек Полесья. Значительную научно-исследовательскую работу проводили кафедра гидравлики (заведующий – доцент Я.Т. Ковалев) и кафедра гидрологии и водоснабжения (заведующий – заслуженный деятель науки и техники БССР И.М.Лившиц). Этими кафедрами разрабатывались методы гидротехнических и водохозяйственных расчетов при проектировании мелиоративных систем в Беларуси, которые широко использовались проектными организациями в республике и за ее пределами.

В 1952 году в БПИ был создан объединенный совет гидротехнического и строительного факультетов по присуждению ученых степеней кандидата технических наук под председательством профессора Ф.П. Винокурова.

С 1961 года водохозяйственное направление БГПА – на факультете гидротехнического и дорожного строительства. В 1978 году это направление получило дальнейшее развитие и снова было выделено в отдельный факультет – факультет гидротехнического строительства, который просуществовал до 1986 года.

В 1986 году в БПИ была проведена реорганизация, в результате которой был создан новый факультет – факультет энергетического строительства (ФЭС), в состав которого полностью включен бывший факультет гидротехнического строительства.

В настоящее время на факультете ведется подготовка инженерных кадров по следующим специальностям водохозяйственного направления: «Водохозяйственное строительство» (специализации «Гидротехническое строительство» и «Водные пути и порты») и «Водоснабжение, водоотведение, очистка природных и сточных вод». Подготовку по этим специальностям и специализациям осуществляют две выпускающие кафедры: кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство» и кафедра «Водоснабжение и водоотведение». Кроме того, в 2004 г. на факультете начата подготовка инженерных кадров по специальности «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта». Выпускающей кафедрой по этой специальности назначена кафедра «Гидравлика».

Подводя итоги 90-летней работы БНТУ в водохозяйственном направлении можно назвать следующие цифры и факты. Подготовлено около 3500 специалистов для Республики Беларусь и для 50

стран, работающих в различных отраслях водного хозяйства (гидроэнергетика, мелиорация, водный транспорт, водоснабжение и т.д.). Много выпускников БНТУ работало и работает на руководящих должностях в Беларуси и других странах. Можно с гордостью назвать некоторые имена наших выпускников. Начальник строительства Нурекской ГЭС в Таджикистане Седых Е.К., начальник строительства Токтогульской ГЭС в Киргизии Рутман Л.Б., в Беларуси – председатель Комитета по науке и технологиям Войтов И.В., Председатель департамента по мелиорации и водному хозяйству при Минсельхозпрод Булыня А.А., заместитель председателя минского облисполкома Мирчук А.В., директора института "Белгипроводхоз" Романенко А.М., Масюк В.М. Красуцкий А.А., директора Центрального НИИ по комплексному использованию водных ресурсов Мурашко М.Г. и Мурашко А.И., заместитель Министра жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь Сушко С.А., начальник Управления морского и речного флота Министерства транспорта Говоровский Б.И. и его заместитель Чернобылец А.Н., ректоры, проректоры, деканы и заведующие кафедрами вузов Коршун Л.И., Балыкин М.К., Заяц В.Н., Синицын Н.В., Богославчик П.М., Михневич Э.И., Лазаревич И.Г., Круглов Г.Г., Шимко К.И., Старинский В.П., Филиппович И.В. и др.). Под руководством преподавателей кафедр подготовили и защитили кандидатские диссертации не только отечественные соискатели, но и более десяти иностранных граждан из Болгарии, Лаоса, Египта, Афганистана, Гвинеи, Колумбии, Панамы, Непала и Ганы.

В настоящее время выпускающие кафедры факультета водохозяйственного направления – не только образовательные, но и мощные научные центры. Здесь проводится большая научно-исследовательская работа, результаты которой широко используются в водохозяйственных отраслях. По предложениям и исследованиям кафедры гидротехнического и энергетического строительства в мелиоративном строительстве Беларуси используются типовые конструкции водопропускных и водосбросных сооружений, построены Плявиньская ГЭС (Латвия); вторая в мире искусственная трасса водного слалома (г. Минск) и др., разрабатываются проекты реконструкции малых ГЭС и проекты гидротехнических сооружений Полоцкой (р. Западная Двина) и Гродненской (р. Неман) ГЭС. Кафедра гидротехнического и энергетического являлась исполнителем несколь-

ких тем в государственной научно-технической программе "Минеральные удобрения", активно сотрудничая с ОАО "Белгорхимпром". Кроме того, постоянно ведутся гидравлические и фильтрационные исследования по заданиям госконцерна "Белмелиоводхоз". Кафедра активно участвует в подготовке нормативных документов, в частности при тесном сотрудничестве с предприятием «Стройтехнорм» подготовлены и готовятся к изданию ряд технических кодексов установившейся практики. Кафедра «Водоснабжение и водоотведение» принимала активное участие в разработке Строительных норм Беларуси (СНБ) и пособий к ним по водоснабжению, водоотведению, водохозяйственному строительству, являлась головной по Отдельному научно-техническому проекту (ОНТП) «Разработать комплексную программу инженерно-экологической и медико-биологической реабилитации Нарочанского курортно-рекреационного региона». Преподаватели кафедры являются членами ряда международных и республиканских научно-технических комитетов и союзов, общественных академий, принимают активное участие в работе международных конференций, конгрессов и симпозиумов по проблемам гидроэкологии, водного хозяйства, водоснабжения и водоотведения. На кафедрах факультета имеются магистратура и аспирантура.

Кроме указанных кафедр и лабораторий вопросами водного хозяйства на факультете занимается так же научно-исследовательская лаборатория «Водохозяйственное строительство». Работает совет по защите докторских диссертаций под руководством ректора БНТУ, академика АН Беларуси Б.М.Хрусталева, на котором защищаются диссертации на соискание ученых степеней докторов и кандидатов наук, в том числе и по следующим водохозяйственным специальностям: 05.23.04 – "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов" 05.23.07 – "Гидротехническое и мелиоративное строительство" 05.23.16 – "Гидравлика и инженерная гидрология".

Таким образом, пройден большой путь развития высшего технического образования в области водного хозяйства. Сегодня факультет энергетического строительства – это не только современные кафедры и лаборатории, это в первую очередь, коллектив, объединяющий высокопрофессиональных специалистов, которые в состоянии решать как задачи подготовки кадров высшей квалифи-

кации, так и современные научные проблемы на самом высоком уровне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. История Белорусского национального технического университета/ К.И. Баландин, Г.А. Алдагушин, А.Т. Арбузов [и др.]; под общ. ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: БНТУ, 2006. – 232 с.: ил.
2. История Белорусской государственной политехнической академии/ К.И. Баландин, Г.А. Алдагушин, А.Т. Арбузов [и др.]; под общ. ред. Б.М. Хрусталева. – Минск: УП «Технопринт», 2000. – 196 с.: ил.
3. Белорусский политехнический институт. – Минск: Изд-во БГУ им В.И. Ленина, 1974. – 144 с.: ил.
4. Высшему водохозяйственному образованию в БГПА – 80 лет: сб. Водное хозяйство и гидротехническое строительство. / П.М. Богославчик, Г.Г. Круглов, Э.И. Михневич. Вып. 21, С. 3-8.

УДК 626/628

А.А. Красуцкий, Б.А. Сидорович (БГВХ)

### **АВТОРИТЕТ УКРЕПЛЯЕМ ДЕЛАМИ**

Белорусский Государственный институт по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства «Белгипроводхоз», ныне – Проектно-изыскательское республиканское унитарное предприятие «Белгипроводхоз» (РУП «Белгипроводхоз») образован приказом Министерства мелиорации Белорусской ССР от 9 мая 1951 г. № 165 путем переименования треста «Белмелиопроект» и присоединения к нему Пинской конторы «Полесмелиопроект».

Институт располагался в городе Минске по улице Коммунистическая, 11.

В институте были созданы: Пинская экспедиция, Брестская, Витебская, Бобруйская, Гродненская изыскательские партии, проектные отделы

Производственная площадь в г. Минске составляла 135 м<sup>2</sup>, а численность 135 специалистов.

Свои первые шаги институту приходилось делать в невероятно трудных условиях при недостатке финансовых ресурсов, кадров и крайне слабой материально-технической базе. Инструменты, в основном, были трофейные, в качестве транспортных средств использовались колхозные лошади. В распоряжении предприятия было всего 6 грузовых автомобилей.

Первым директором был Василий Мартынович Зубец, а главным инженером Ефим Иванович Лубяко, благодаря усилиям, которых коллектив решал грандиозные, по тем временам, задачи.

Так, в 1954 году была завершена разработка Схемы освоения Полесской низменности, получившая высокую оценку специалистов, ученых, одобренная союзным правительством.

В 1958-1959 г.г. разработан уникальный и самый крупный в СССР проект реконструкции мелиоративных систем в бассейне р. Орессы на площади более 100 тысяч гектаров. Параллельно велись изыскательские и проектные работы на крупных болотных массивах в бассейнах рек Начи, Неначи, Грезы, Брагинки, Вислицы, Нератовки и др. на сотнях тысяч гектаров, благодаря чему уже к 1960 году площадь осушенных земель в республике составила 566 тысяч гектаров.

Десятилетие 1961-1970 г.г. по праву является первым периодом бурного развития института. Объемы работ, выполненные институтом к 1970 году, более чем в 15 раз превысили уровень 1951 года. Площадь осушенных земель в республике с 566 тысячи гектаров в 1960 году достигла 1785 тысяч гектаров в 1970 году. Численность работников института в 1970 году составила 1482 специалиста и превысила уровень 1951 года более чем в 10 раз. Значительно укрепилась производственно-техническая база. Увеличилась мощность автопарка, внедрялись в производство современные буровые установки, новейшие инструменты и приборы, высокопроизводительная множительная техника.

В 70-х годах разрабатывается проектное задание на строительство водохозяйственного комплекса «Любань» на реке Орессе и проектное задание на строительство Солигорского водохранилища на реке Случь.

Разрабатываются Схемы комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов в бассейнах рек. Наиболее крупными из них стали схемы в бассейне реки Западная Двина на территории

Беларуси, России, Литвы, Латвии и Эстонии в бассейне реки Сож, реки Западный Буг. В 1978 году составляется ТЭО инженерных мероприятий по защите от затоплений и мелиорации поймы реки Припять на площади 425 тысяч гектаров.

Проектируются крупные водохозяйственные комплексы «Красная Слобода», «Локтыши», «Селец».

Белгипроводхоз одним из первых в стране откликнулся на призыв оказания помощи по освоению Российского Нечерноземья. Наряду с большим количеством рабочих проектов по осушению земель разрабатываются уникальные проекты строительства совхозов «Белорусский» – в Псковской области, «Ташкенский» – в Новгородской области, овощного совхоза в Тюменской области, перспективные проработки для Смоленской и Архангельской областей.

В связи с 25-летием образования института, указом Президиума Верховного Совета БССР от 25 октября 1976 года институт «Белгипроводхоз» награжден Почетной Грамотой Верховного Совета БССР.

С 1986 года специалисты предприятия активно участвуют в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Разрабатываются проекты предотвращения попадания загрязненных вод в реки, комплекс мероприятий по обеспечению получения чистой продукции на загрязненных территориях. В этой работе принимают участие более 200 человек.

В настоящее время на предприятии трудятся 327 специалистов по различным направлениям деятельности предприятия, из них 83 молодых специалиста в возрасте до 30 лет. Разнонаправленность, многообразие выполняемых работ требует от коллектива высокой квалификации, собранности, деловитости, компетентности. Сегодня коллектив обладает большим опытом, высоким профессиональным мастерством и старается решать самые сложные задачи.

В соответствии с Уставом, Предприятие осуществляет проектирование зданий и сооружений I и II уровней ответственности и проводит инженерные изыскания для этих целей по лицензии, выданной Министерством архитектуры и строительства Республики Беларусь 02250/0189689, а также выполняет функции генерального проектировщика.

В 2007 г. институт успешно прошел сертификационный аудит Системы менеджмента качества на соответствие требованиям Меж-

дународного стандарта ISO 9001:2000. В институте осуществляется комплексный подход к выполнению инженерных изысканий и проектных работ, постоянно развивается материально-техническая база: мы располагаем новейшими персональными компьютерами и современными программными средствами. Имеется уникальный архив изысканий и проектов, богатая информационная база.

Сегодня «Белгипроводхоз» выполняет комплекс проектно - изыскательских работ: топографию и геодезию, инженерно-геологические и гидрологические изыскания, почвенные и ботанико-культуртехнические исследования, агроэкономические изыскания, производит лабораторные исследования агрохимических показателей почв, физико-механических свойств грунтов, качества и агрессивности грунтовых и поверхностных вод, разработку проектно – сметной документации на строительство, ремонт, реконструкцию и модернизацию объектов мелиоративного, водохозяйственного, дорожного, промышленного и сельскохозяйственного строительства, инженерного обеспечения, объектов рыбного хозяйства.

Основным направлением работы предприятия в области мелиорации земель в настоящее время становятся реконструкция и ремонт мелиоративных систем. Мы являемся одним из основных исполнителей Республиканских программ по защите населенных мест и сельскохозяйственных угодий от паводков, сохранения и использования мелиорированных земель, рыбной отрасли. Предприятие разрабатывает проекты водного благоустройства городов и поселков, водноспортивных сооружений.

Только за 2009 год разработана проектно-сметная документация на реконструкцию мелиоративных систем на площади более 3,3 тыс. гектаров, агромелиоративные мероприятия на площади 8,2 тыс. гектаров, составлена документация на ремонт открытых каналов протяженностью более тысячи километров.

Запроектировано ряд объектов инфраструктуры рыбхозов «Волма», «Красная Слобода», «Селец», «Новинки» и др. Заслуживает внимание проектная документация по инкубцеу Новинки, реконструкции селекционно-племенного участка «Изобелино», садковому хозяйству «Селец».

Перспективное направление деятельности предприятия связано со строительством малых гидроэлектростанций. Для этой цели в

структуре организации создано подразделение по проектированию объектов гидроэнергетики.

Предприятие принимало участие в разработке технико – экономических решений по восстановлению и развитию малой гидроэнергетики в Республике Беларусь, разработке документации на реконструкцию и восстановление Добромысленской, Рачунской и Тетеринской ГЭС, на строительство ГЭС на р. Неман в районе г. Гродно установленной мощностью 18,0 тыс. кВт. Прекрасный пример в этом отношении – гидроэлектростанция на Солигорском водохранилище мощностью свыше 250 кВт, малые ГЭС на Дубровском, Зельвенском и ряду других водохранилищ республики, которые введены в эксплуатацию и эффективно работают.

По проектно-сметной документации, разработанной в последние годы, построен Августовский канал, где реставрированы 4 судоходных шлюза и 5 водопропускных сооружений, созданных в XIX столетии; построены магистральные газопроводы и сопутствующие сооружения; завершено строительство гребного канала международного значения в г. Заславле, строится ряд других уникальных объектов.

Предприятие активно сотрудничает с зарубежными компаниями и организациями. Это, прежде всего, с газотранспортным комплексом в лице РАО "Газпром" и его подразделениями в областях Российской Федерации, а также Украины. Имеются положительные отзывы на работы, выполненные по заказу ОАО "Гипроспецгаз" (г. С.-Петербург).

РУП "Белгипроводхоз" имеет Представительство в Российской Федерации (г. Москва).

Для успешного проведения проектно-изыскательских работ, как в области мелиорации, так и по другим направлениям, в институте есть все необходимое: производственная база, машины и механизмы, комплексная, оснащенная современным оборудованием лаборатория для проведения анализов грунтов, почв, поверхностных и грунтовых вод, подразделение по выпуску проектов, аккредитована лаборатория по ремонту и поверкам средств измерений. И, конечно, квалифицированные, нацеленные на творчество специалисты.

По сложившейся традиции на предприятии в конце года производится присвоение званий «Почетный ветеран труда» и «Ветеран

труда» и посвящение молодых специалистов в профессию с вручением памятных сувенирных медалей и премий.

Все это позволяет с уверенностью сказать, что РУП «Белгипроводхоз» удерживает завоеванные позиции на рынке проектно-исследовательских работ, находится на хорошем счету в республике и приглашает заинтересованных к тесному и плодотворному сотрудничеству по различным направлениям.

*УДК. 681.518.3. 551.501. [556.535+551.577]*

В.П. Рогунович (БНТУ)

## **ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА В СЛОЖНЫХ БАССЕЙНАХ РЕК**

В последние десятилетия во многих странах возникали большие ущербы от паводков и наводнений. Случаются даже человеческие жертвы. В работе сделана попытка анализа причин современного обострения явления и выработки на ближайшую перспективу предложений по уменьшению потерь. Представляется, что основными причинами могут быть глобальное потепление климата и активное обустройство пойм. Уменьшение ущербов возможно на данном этапе на основе уточнения математического моделирования водного режима обустроенных пойм и территорий.

Несмотря на многовековой опыт защиты от затоплений, усовершенствование строительных технологий и выполнение больших объемов работ, все чаще затопляются обустроенные поймы. Возникают чрезвычайные режимы уровней и расходов там, где гидрологическая ситуация представлялась вполне прогнозируемой и обеспеченной. Ущерб от затоплений защищенных земель и обустроенных территорий продолжают увеличиваться во всех странах. Возникла парадоксальная ситуация: чем выше уровень цивилизации, тем больше ущерб от затоплений. Только в 2005г. в период весенних паводков на Беларуси были подтоплены 300 жилых домов, 1493 подворья, 329 хозяйственных построек, 584 промышленные постройки, 100 зданий различного назначения, 12 га сельхозугодий.

Частично была нарушена жизнедеятельность 4385 человек [2]. Суммарный среднегодовой ущерб от наводнений в Беларуси оценивается в 150 млн. руб. (в ценах 1990г.) [11] Установлено увеличение экстремальных величин стока в период после 1965г. на Припяти с 14 % до 30 %, на Западной Двине с 16 % до 26 % [4].

Поэтому, с одной стороны, необходимо выяснять причины современного обострения явления, а с другой, – разрабатывать предложения по уменьшению потерь от затоплений.

По поводу причин можно сказать следующее. Одной из них может быть глобальное потепление климата. Глобальное потепление привело в последние десятилетия на Беларуси к регулярному положительному приращению температур приблизительно на + 0,4 °С по отношению к средней многолетней: 1971-1980 гг.от -0,3 °С до +0,0 °С, 1981-1990 гг. приблизительно +0,4 °С, 1991-2000 гг. приблизительно +0,8 °С [7]. Оно приводит к гидрологическим условиям формирования паводков, отличных от расчетных, использованных при проектировании систем защиты.

Второй причиной может быть интенсивное обустройство и хозяйственное использование долин рек, трансформирующих водный режим водотоков. Обе причины совместно и порознь приводят к новым условиям формирования водного режима паводков и наводнений в бассейнах рек.

Надежное восстановление естественных рядов стока, когда начали систематически влиять климатические факторы в условиях постоянно обустраивающихся территорий пойм практически невозможно, а следовательно, нельзя надежно планировать защитные мероприятия по изменяющимся гидрологическим условиям.

Представляется, что в складывающейся новой гидрологической и хозяйственной ситуации в бассейнах рек можно в значительной мере уменьшить ущерб от затоплений на первом этапе за счет повышения точности математического моделирования современной системы водотоков бассейна реки, прежде всего учетом средствами идентификации новых особенностей движения воды на обустраивающихся долинах рек. Надежный учет постепенно изменяющихся гидрологических условий в бассейне реки, вызванных потеплением климата, а также и обустройством пойм возможен на втором этапе за счет создания измерительных информационных систем [8].

Обратим внимание на существенные особенности движения воды в сложных бассейнах рек со спокойным как в Беларуси рельефом.

Во время паводков и наводнений весьма часто потоки воды выходят на широкие поймы и затапливают залесенные, закустаренные, используемые в сельском хозяйстве земли и обустроенные территории. На различных частях поймы из-за залесенности и закустаренности, плотность которой значительно изменяется в течение года, сопротивление движению воды существенно изменяется, возникают непроточные, «нетранзитные» зоны, размеры которых изменяются по сезонам в зависимости от состояния растительного покрова и глубины воды. При обтекании сооружений на обустроенных территориях также возникают нетранзитные зоны, но они более стабильны. Все нетранзитные зоны фактически играют роль аккумулярующих емкостей и могут быть значительными. К примеру, в бассейне реки Припять ширина поймы достигает 20 – 30 км, причем при определенных уровнях воды нетранзитные зоны достигают  $\frac{3}{4}$  ширины. Аналогичная проблема нетранзитных зон возникает и за животноводческими комплексами, которых в поймах рек только в республике Беларусь десятки. Все это существенно влияет на режимы затоплений в бассейнах рек.

Существенные особенности движения воды в сложных системах водотоков бассейнов рек невозможно учесть, непосредственно используя в качестве исходной систему уравнений движения Сен-Венана. Исследования В.С.Никифоровской [3] показали, что приемлемой точности моделирования не достичь как при условии учета всей поймы как аккумуляющей емкости – М.В. Эббот, – так и при учете сечения поймы суммарно с сечением водотока по обычным гидравлическим зависимостям. Поэтому на основе использования работ школы акад. РАН Васильева О.Ф., а именно: Атавина А.А., Воеводина А.Ф., Гладышева М.Т., Шугрина С.М., нами [5] была предложена обобщенная система одномерных уравнений движения. При получении уравнения непрерывности использован закон сохранения массы. В него вошли, естественно, характеристики всего сечения водотока, включая русло и пойму. В динамическом уравнении движения предложено использовать только характеристики транзитных частей сечения, поскольку оно получено из закона сохранения импульса, который в нетранзитных зонах сечения равен

нулю. Нетранзитные зоны сечений выделяются по специальной методике, итеративно учитывающей локальное сопротивление движению воды над каждым элементом периметра по условию, что скорость движения воды над каждой нетранзитной зоной существенно меньше средней в сечении. Таким образом, получены следующие обобщенные уравнения нестационарного движения воды [5, 6], пригодные к использованию в случаях выхода потока на сложную пойму:

$$\begin{cases} B_0 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2\beta v \frac{\partial Q}{\partial s} + (c^2 \cos \theta - \beta v^2) B \frac{\partial h}{\partial s} = g A \sin \theta - g A \frac{Q|Q|}{K^2} + \beta v^2 \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_h \end{cases}$$

где  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  
 $A$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;  
 $B_0$  – ширина водного сечения, м;  
 $B$  – ширина живого сечения, м;  
 $h, s$  – гидравлическая ортогональная правая система координат, у которой ветвящаяся ось  $s$  проходит через минимальные отметки дна, м;

$c = \sqrt{gA/B}$  – скорость распространения малых возмущений, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$t$  – время, с;

$v$  – средняя в сечении скорость потока, м/с;

$\beta$  – коэффициент удельного количества движения (коэффициент Буссинеска);

$\theta$  – угол наклона линии, соединяющей минимальные отметки дна характерных сечений водотока, отсчитываемый против часовой стрелки от положительного направления оси  $s$  до горизонтальной плоскости на данном локальном участке бассейна реки, рад.

Заметим, что в случае отсутствия нетранзитных частей сечения  $B_0 = B$  и предложенные уравнения движения превращаются в одну из форм записи уравнений Сен-Венана.

Казалось бы естественным использование для математического моделирования водного режима в сложных бассейнах рек программного комплекса SMS – SURFACE-WATER MODELING SYSTEM. Он использует в качестве исходной информации данные Географической Информационной Системы и возможности одно- и двумерного моделирования водного режима в бассейнах рек. Однако в имеющихся описаниях SMS не излагаются важнейшие исходные научные положения, использованные при создании системы:

– как осуществляется интерполяция параметров уравнения движения во времени и пространстве при моделировании водного режима?

– как оценены ли погрешности моделирования по измерениям на эталонном объекте?

Неясность названных, а также подобных других вопросов мешает формальному использованию SMS, тем более, что многие вопросы требуют не только программной, но и глубокой гидродинамической проработки.

Представленные выше обобщенные уравнения движения были использованы для моделирования водного режима в бассейне реки Припять, где практически регулярно – 9 раз в 10 лет – возникали ущербы от паводков и наводнений в сотни миллионов долларов США. Поэтому проблема защиты поселений и сельхозугодий от затопления в бассейне р. Припять существовала давно, однако значительные практические мероприятия по ее решению были предприняты на государственном уровне лишь в 70-80 годы.

На рисунке 1 представлены граф-схема сложной системы водотоков бассейна р. Припять суммарной длиной 1,1 тыс. км.

Моделирование водного режима выполнялось совместно с Белгипроводхозом для обоснования инженерных решений системы защиты от затоплений десятков поселений и 400 тыс. га земель на основе представленных выше обобщенных уравнений нестационарного движения воды [6]. Отметим, что моделирование движения воды на графе типа "дерево" позволило установить существенную интересную особенность движения воды в окрестности устья р. Горынь, а именно: в случае, если по Горыни идут большие расходы, соизмеримые с расходом р. Припять, то выше устья Горыни, как показало моделирование, Припять течет вспять. Этим можно объяснить

большие затопления в окрестности устья Горыни. При большой ширине поймы и наличии многих нетранзитных зон обнаружить движение реки вспять инструментальными средствами невозможно. Дать научное объяснение явления позволили методы математического моделирования.

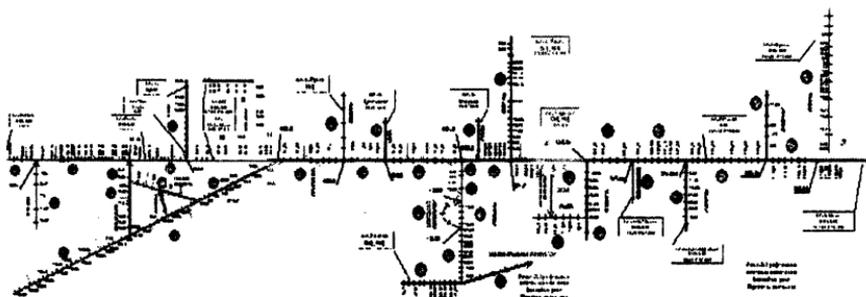
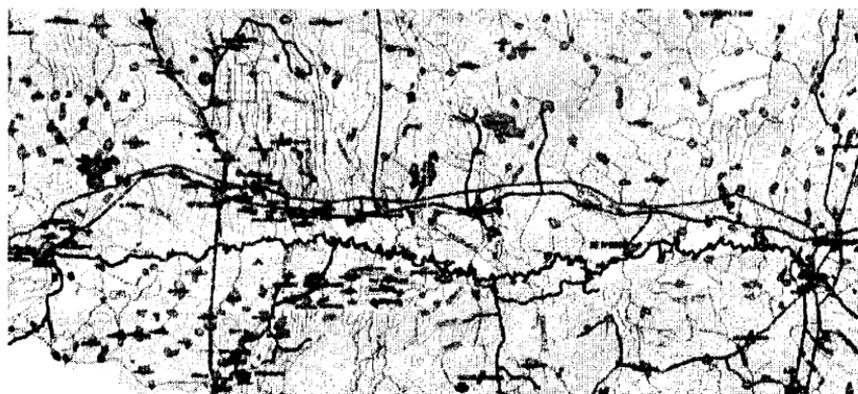


Рисунок 1 – Граф-схема водотоков р. Припять

Средняя погрешность вычисления максимального уровня в системе естественных водотоков бассейна вероятностью 0,95 равна 0,1 м, а с вероятностью 0,99 она не превышает 0,25 м. Это дало возможность Белгипроводхозу результаты математического моделиро-

вания положить в основу определения высотного положения дамб системы обвалования.

Заметим, что прежде чем выполнить моделирование такого сложного объекта, было проведено тестирование комплекса программ на известном эталонном объекте по измерениям ГТИ водного режима р. Тверца, которое дало весьма удовлетворительные результаты.

Таким образом, имеются необходимые предпосылки для создания математических моделей водного режима сложных систем водных объектов.

В настоящее время находятся в эксплуатации 25 ГЭС общей мощностью 10 МВт [1]. По перспективной программе развития ГЭС планируется построить на крупных реках (Западная Двина, Днепр, Неман) 9-10 водохранилищ, расположенных выше городов (Полоцк, Новополоцк, Могилев, Гродно). Начато проектирование ГЭС на Западной Двине. При проектировании и затем эксплуатации упомянутых водных объектов уместно и даже необходимо использовать имеющийся опыт математического моделирования водного режима систем водотоков.

Отметим две существенные особенности математического моделирования водного режима пойм на городских территориях, которые, как правило, обустройстваются волевыми решениями. Во-первых, на многих водотоках необходимо выполнять моделирование, когда имеется верховое водохранилище и много водохранилищ иного порядка и гидросооружений на водотоках. В этом случае формулировка задачи существенно осложняется необходимостью учета многих внутренних граничных условий, моделирующих работу гидротехнических сооружений, которое сложно само по себе. Во-вторых, создание больших водохранилищ в районах выше крупных городов требует моделирования прерывных волн, образующихся в случае разрушения подпорных сооружений.

Принципиально вопросы движения волн прорыва достаточно детально изучены школой академика РАН Васильева О.Ф. в ИГиЛ СО РАН – Притвиц Н.А., Шугрин С.М., Гладышев М.Т., – в том числе и в случае движения волны прорыва и «посуху», т.е. на пойме. Все же прерывная волна достаточно быстро усполаживается, поэтому дальнейшее моделирование выполняется описанными выше методами.

При всех достоинствах и возможностях методов и средств математического моделирования они позволяют лишь уточнить водный режим обустроенных пойм. Надежность этой оценки не может быть высокой, так как изменяется обустройство территорий, примыкающих к водотокам, изменяется климат. Это приводит к невозможности задания с высокой точностью граничных условий и боковой приточности при создании математической модели, поэтому из-за невысокой точности моделей становится невозможным надежное прогнозирование водного режима, неожиданно возникают экстремальные уровни и расходы и их следствие – чрезвычайные ситуации.

Для надежного и высокоточного прогноза в таких условиях необходимо в будущем в создавать автоматические измерительные системы окрестности паводкоопасных объектов, а затем в бассейне реки в целом [8]. В настоящее время уже имеются необходимые предпосылки их создания, а именно: представленные математические модели имеются и автоматические средства измерений уровней и расходов воды в сложных сечениях водотоков [8], созданы метрологически обеспеченные [9] основы центра передачи, приема и обработки данных наблюдений [10].

Математические модели – одно из основных средств, использующихся для обоснования эффективных проектных и управленческих решений в ординарных и чрезвычайных ситуациях. Например, где, в каком водохранилище и в какое время нужно задержать объемы воды, чтобы ущербы были минимальны.

Эти работы выполняются в настоящее время на кафедре гидротехнического и энергетического строительства Белорусского национального технического университета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Круглов, Г.Г., Линкевич, Н.Н. Опыт натурных обследований гидротехнических сооружений неэнергетического назначения и малых ГЭС с целью их восстановления // Строительная наука и техника. – 2008. – № 6. – С. 92-94.
2. Национальная система мониторинга окружающей среды республики Беларусь: результаты наблюдений. – 2006. – Минск: Бел. НИЦ «Экология», 2007. – 350 с.

3. Никифоровская, В.С. О численных моделях неустановившихся течений в руслах с поймами // *Динамика сплошной среды* – 1978, вып. 35. – С. 89-98

4. Изменение климата и последствия. – Под общ. ред. акад. В.Ф Логинова. – Минск: ОДО "Тонпик", 2003. – 330 с.

5. Рогунович, В.П. Расчет водного режима систем водотоков. Всес. симпозиум "Численные методы в гидравлике", г.Телави, 14.04.1980-18.04 1980. – Л.: 1980. – С. 54-57.

6. Рогунович, В.П. Автоматизация математического моделирования движения воды и примесей в системах водотоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1989-264 с.

7. Рогунович В.П. Потепление и экстремальные природные явления в гидросфере Беларуси. // *Природные ресурсы*. – 2009. – № 1. – С. 78 –84.

8. Рогунович, В.П. Средства для эффективного обустройства бассейнов рек. // *Природопользование*. – 2009. – № 15. – С. 88-94.

9. Рогунович В.П., Варфоломеев В.А., Евдокимов В.А. Измерение параметров нестационарных процессов. // *Метрология и приборостроение*. – 2009.-№1. – С. 23-26.

10. Рогунович, В.П., Евдокимов, В.А., Лютко, Г.П., Микулович, В.И., Шнитко, В.Т, Варфоломеев, Ю.А. Автоматическая измерительная информационная система для исследования разрывных и плавно изменяющихся течений. // *Вестник БНТУ*. – 2009. – №4. – С. 8-12.

11. Рутковский, П.П. Проблема наводнений в Республике Беларусь и пути ее решения / П.П. Рутковский // *Природные ресурсы*. – 2001. – № 1. – С. 59–63.

Б.И. Говоровский (Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь), О.Б. Корбут (БНТУ)

## **СУДОХОДНЫЕ ШЛЮЗЫ В БЕЛАРУСИ – НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ**

Возведение судопропускных сооружений в Беларуси обусловлено реконструкцией Днепро-Бугского канала (ДБК), построенного в 1775-1843 гг. В середине 20-го столетия на восьми из 12 гидроузлов канала построены деревянные судоходные шлюзы: "Дубой" (ГУ № 1), "Радогощ" (ГУ № 3), "Овзичи" (ГУ № 4), "Ляховичи" (ГУ № 5), "Кобрин" (ГУ № 6, 7), "Залузье" (ГУ № 8), "Новосады" (ГУ № 9), "Тришин" (ГУ № 10), – которые успешно эксплуатировались до начала 90-х годов. Конструктивно все шлюзы были выполнены одно-типно: камеры длиной 80 м расширялись в плане от 11,2 м у ворот до 18,0 м (рисунок 1) при глубинах на короле от 1,9 до 2,4 м. Наполнение камер производилось через клинкеты в двустворчатых воротах. Действующие напоры на камеры составляли от 1,4 до 3,0 м, продолжительность шлюзования – 28-30 минут.

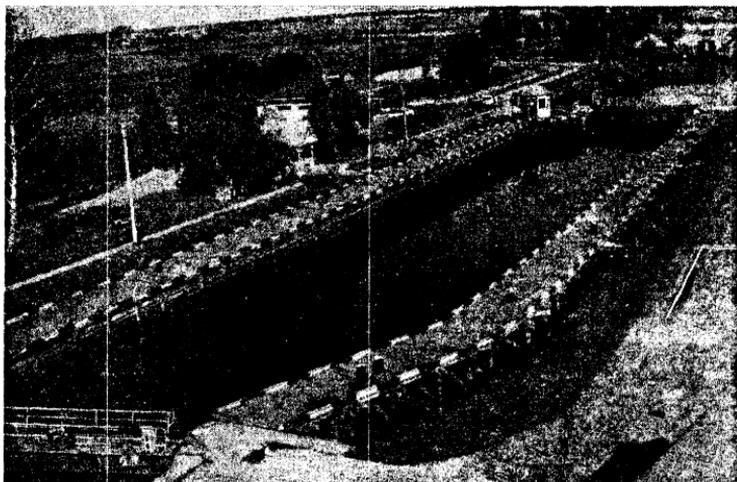


Рисунок 1 – Деревянный шлюз "Дубой"

Построенные в 1941-м и восстановленные в послевоенные годы, эти шлюзы имели полный износ и поддерживались за счет выборочного текущего и капитального ремонта, что не улучшало коренным образом их технического состояния. Кроме того, их технические характеристики не соответствовали параметрам судоходных шлюзов европейской воднотранспортной системы.

В соответствии с Программой развития речных и морских перевозок в 1999-2003 годах осуществлялась реконструкция судоходного шлюза "Новосады". Основные объемы работ выполнялись только в межнавигационный период в связи с тем, что строительство велось в створе существующего судового хода. На месте старого деревянного шлюза возведено новое бетонное сооружение с камерой длиной 120 м, шириной 12,7 м и глубиной на короле 2,4 м. Значительное уменьшение объема сливной призмы с 4750 до 3658 м<sup>3</sup> и замена механизмов управления створками ворот на современный гидравлический привод позволили уменьшить продолжительность шлюзования с 28 до 14 минут. В октябре 2003 года обновленный судоходный шлюз "Новосады" европейского класса Va торжественно сдан в эксплуатацию (рисунок 2).

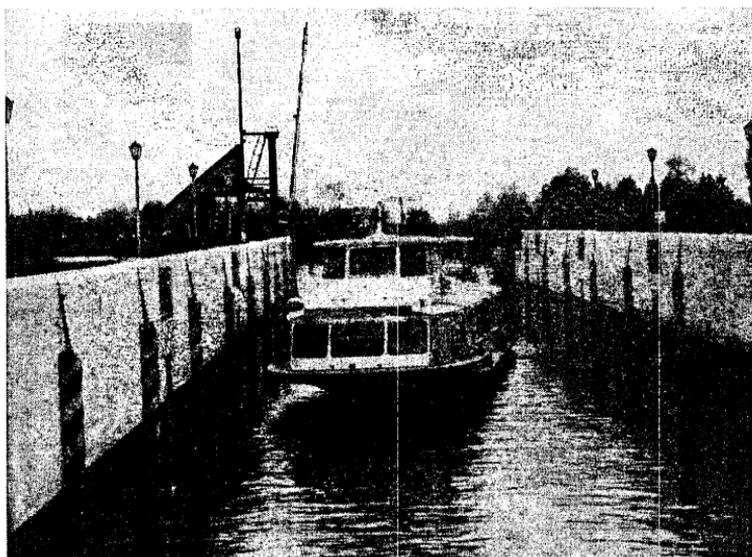


Рисунок 2 – Проводка судна через реконструированный шлюз "Новосады"

Государственной программой развития внутреннего водного и морского транспорта до 2010 года, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 407 от 26.03.2003г. и предусматривающей интеграцию водных путей Беларуси в европейскую воднотранспортную систему, определены объекты реконструкции ДБК на ближайшую перспективу.

К 2003 г. осуществлена реконструкция плотин ГУ "Новосады", "Тришин", "Выгода", "Ветлы", судоходного шлюза "Новосады".

В 2004-2007 гг. реконструированы водопитающая система ДБК и судоходный шлюз "Дубой" (рисунок 3). При строительстве шлюза "Дубой" были учтены все проблемы, возникшие при строительстве шлюза "Новосады", и принято решение о возведении судоходного шлюза параллельно существующему, что позволило сократить вдвое срок строительства без прекращения судоходства. В конструкцию шлюза внесены существенные изменения.

На верхней голове шлюза устроены поворотные ворота на горизонтальной оси (клапанный затвор), что позволило уменьшить затраты на устройство системы наполнения камеры шлюза. На месте существующего шлюза возведена малая ГЭС мощностью 330 кВт.

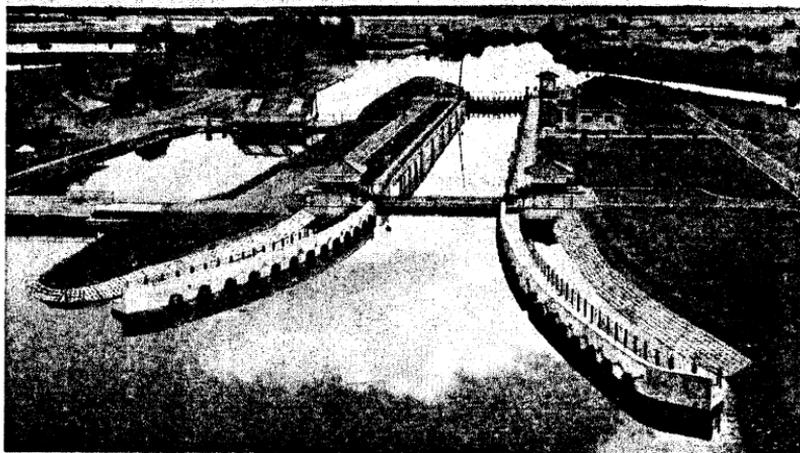


Рисунок 3 – Гидрозел "Дубой" после реконструкции. На месте старого шлюза – малая ГЭС

В 2009 году завершено строительство судоходного шлюза "Кобрин" (рисунок 4) на западном склоне канала. Конструктивные решения аналогичны судоходному шлюзу "Дубой". Шлюз с камерой 120x12,7 м и полезным напором 5,35 м построен взамен двух существующих деревянных шлюзов "Кобрин-6" и "Кобрин-7", имеющих полный физический и моральный износ. Система управления шлюзом автоматизирована. В створе гидроузла построена малая ГЭС, что позволило расширить использование гидроэнергетического потенциала Днепро-Бугского канала.

В 2010 году будет начато строительство судоходного шлюза в г. Брест.

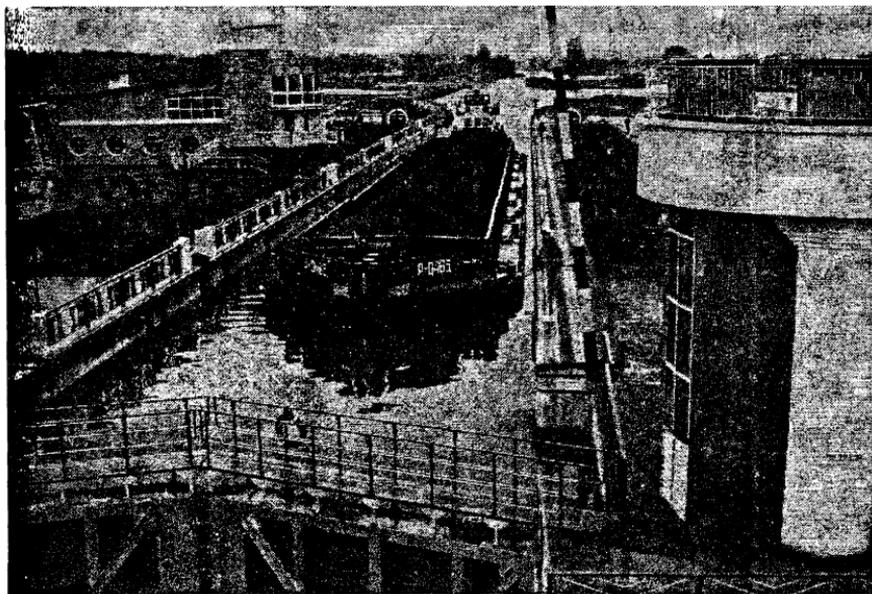


Рисунок 4 – Новый судоходный шлюз "Кобрин"

Новый этап строительства судоходных шлюзов связан с проектированием гидроузлов комплексного назначения на крупных реках Беларуси – Немане и Западной Двине.

По экспертной оценке, габаритные размеры камер шлюзов Полоцкой и Гродненской ГЭС составят в соответствии с евростандартом  $120 \times 12,5 \times 2,4$  м при напорах до 8,0 м.

На этапе обоснования инвестиций в строительство наиболее детально выполнены проработки для шлюза Гродненской ГЭС.

Расчетная высота стен 11,5 м с учетом связных грунтов в основании предполагает устройство камеры с разрезным днищем (Свицкий тип), однако в случае выдвигания ее в верхний бьеф возможна также конструкция и с неразрезным днищем (доковый тип). Сравнивались две схемы питания шлюза – из-под щита с устройством стенки падения и через короткие обходные галереи.

Расчеты продолжительности наполнения камеры из-под щита, выполненные на ЭВМ, показали, что благоприятный режим наполнения достигается оптимальным сочетанием уменьшения скорости поднятия затвора и снижения высоты стенки падения по сравнению с расчетными значениями: при глубине воды над стенкой падения от 2,8 до 3,4 м продолжительность наполнения составит от 345 до 380 с. В случае подачи воды в камеру галереями сечением  $2,0 \times 2,3$  м продолжительность наполнения составит около 400 с. Размеры участков гашения и успокоения в обоих случаях практически одинаковы.

Окончательное решение по выбору конструкции стен, системы питания и отметки порога, а также скорости поднятия затвора предстоит принять заказчику.

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь в 2004-2006 годах выполнена реконструкция белорусского участка Августовского канала с модернизацией судоходных шлюзов.

Реконструкция шлюзов на Днепро-Бугском и Августовском каналах и строительство новых шлюзов на гидроузлах комплексного назначения является началом большого пути в Европу, к портам Балтийского моря.

А.И. Смирнов (НПОО "Малая энергетика"), С.П. Гатилло (БНТУ)

## **НОВЫЙ ЭТАП ВОССТАНОВЛЕНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ГЭС В БЕЛАРУСИ**

В последние десятилетия в Беларуси постоянно ведутся работы по освоению возобновляемых источников энергии. Интерес к возобновляемым источникам стабильно высокий во всем мире в связи с тем, что многие, в том числе и Республика Беларусь, испытывают трудности при расчетах за импортируемые топливно-энергетические ресурсы. В производственном отношении, то есть имеющим практический выход, главным направлением использования возобновляемых источников энергии за последние полтора десятка лет в Беларуси является восстановление и строительство малых ГЭС.

Начался этот уже третий по счету этап (первый проходил в 20-30-х годах, а второй в 40-50-х годах 20 века) развития малой гидроэнергетики в стране в конце 80-х годов, и обусловлен он как вышеназванной причиной удорожания энергоресурсов, так и экологической эффективностью гидроэнергетических ресурсов, а также новейшими наработками в области автоматики и средств управления, позволяющими обеспечить их полную автоматизацию и существенно сократить эксплуатационные затраты.

Анализ накопившегося за это время опыта восстановления и строительства новых малых ГЭС указывает на некоторые сложившиеся стереотипы, а также на новые проявляющиеся тенденции. Например, в качестве основного оборудования в основном стараются применять классические опробованные модели турбин, в первую очередь восстанавливаемые или новые, выполняемые по старым, имевшимся в активе заводов разработкам, особенно, если речь идет о восстановлении гидроэлектростанций, здания которых сохранились. Но в последние годы есть уже примеры применения совершенно новых разработок, а на стадии проектирования есть также опыт применения на малых ГЭС Беларуси конструкций ведущих европейских фирм.

К началу третьего этапа ситуация с эксплуатацией малых ГЭС в Республике была следующей. Из функционировавших в конце 50-х годов полутора сотен ГЭС, к концу 80-х годов в Беларуси в подчи-

нении Министерства энергетики практически работало только четыре малые ГЭС, при этом оборудование на некоторых из них нуждалось в срочной реновации. За минувшие полтора десятка лет работы по восстановлению, реконструкции и строительству малых ГЭС в Беларуси, на первоначальной стадии, выглядевшие как отдельные пробные попытки, превратились в планируемый стабильный процесс, идущий полным ходом, хотя и не лишенный определенных трудностей. В таблице 1 приведен список ГЭС Беларуси, которые за рассматриваемый период подверглись реконструкции или были построены (точнее, пристроены к существующему напорному фронту). Здесь же указаны организации, выполнившие основной объем работ на данном объекте.

Начиная с 1994 года в Беларуси было создано и действует несколько региональных и отраслевых программ по строительству малых ГЭС. Они реализуются с разным успехом, причем основными причинами их неполного выполнения является отсутствие средств, а также недостаточное количество квалифицированных

Таблица 1 – Восстановленные и вновь построенные ГЭС Беларуси

Название ГЭС	Год восстановления или строительства	Установленная мощность, кВт	Организация, выполнившая работы	Характеристика работ
1	2	3	4	5
Добромыслянская	1991	400	«Витебскэнерго»	Восстановление
Клястицкая	1994	700	«Витебскэнерго» «Малая энергетика»	Капитальный ремонт
Гонолес	1994	300	«Малая энергетика» «Минскводоканал»	Восстановление
МикроГЭС на НС № 6 ВМВС	1994	10	«Малая энергетика»	Новое строительство
Жемыславльская	1994	160	«Малая энергетика»	Восстановление
Богинская	1995	400	БЭРН	Восстановление
Лохозвинская	1995	100	«Малая энергетика»	Восстановление
Гомельская	1996	250	«Малая энергетика»	Восстановление

Продолжение табл.1

1	2	3	4	5
Тетеринская	1996	600	БЭРН	Капитальный ремонт
Войтовщина	1997	220	«Малая энергетика»	Капитальный ремонт
Ольховка	1997	120	ПС «Энергия»	Восстановление
Гезгальская	1998	610	«Гродноэнерго» «Малая энергетика»	Текущий ремонт
Яновская	1998	60	ПС «Энергия»	Восстановление
Вилейская (1 оч.)	1998	815	«Минскводоканал» «Малая энергетика» «Минскводстрой»	Новое строительство
МикроГЭС Пружанского ПВС	1998	5	«Малая энергетика»	Новое строительство
Лукомльская (1 оч.)	1999	150	«Малая энергетика» «Лукомльэнерго- монтаж»	Восстановление
Рачунская (1 оч.)	2000	200	«Гродноэнерго» «Малая энергетика»	Восстановление
Лукомльская (2 оч.)	2000	150	«Малая энергетика» «Лукомльэнерго- монтаж»	Новое строительство
Дубровская	2001	110	«Минсмелиовод- хоз»	Новое строительство
Новосёлков- ская	2002	100	«Гродноэнерго» «Малая энергетика»	Восстановление
Вилейская (2 оч.)	2002	815	«Минскводоканал» «Малая энергетика» «Минскводстрой»	Новое строительство
Лепельская	2003	320	«Малая энергетика» «Лукомльэнерго- монтаж»	Восстановление
Селявская	2003	110	«Малая энергетика» «Лукомльэнерго- монтаж»	Восстановление
Немново	2004	200	«Гродноэнерго» ПС «Энергия»	Новое строительство
Васьковцы	2005	75	«Молодечненские эл.сети» «Малая энергетика»	Восстановление

1	2	3	4	5
Браславская	2005	200	«Витебскэнерго» ПС «Энергия»	Восстановление
Паперня	2006	100	«Брестэнерго» ПС «Энергия»	Новое строительство
Солигорская	2006	150	«Минскмелиоводхоз» ПС «Энергия»	Новое строительство
6-я насосная станция ВМВС	2006	75	«Минскводоканал» «Малая энергетика»	Новое строительство
Саковщинская	2007	225	«Минскмелиоводхоз» ПС «Энергия»	Восстановление
Войковская	2007	100	«Минскмелиоводхоз» ПС «Энергия»	Восстановление
Миничи	2007	200	«Брестэнерго»	Новое строительство
Дубой	2007	330	«Днепро-Бугский водный путь» ПС «Энергия»	Новое строительство
Водоохрани- лище ТЭЦ-2, Свислочь	2008	264	«Минскводоканал» «Малая энергетика»	Новое строительство
Жодинская	2009	30	«Минскмелиоводхоз»	Новое строительство
Гореничская	2009	110	«Минскмелиоводхоз»	Новое строительство
Сычевичская	2009	110	«Минскмелиоводхоз»	Новое строительство
Чижевская	2009	320	«Минскводоканал» «Малая энергетика»	Новое строительство
Кобринская	2009	200	«Днепро-Бугский водный путь» ПС «Энергия»	Новое строительство

специалистов, имеющих опыт практической работы. С появлением самой значительной из программ строительства гидроэлектростанций, принятой концерном «Белэнерго», и рассчитанной на срок до 2020 года, возможно, появятся сдвиги к лучшему, особенно, если она будет подкреплена финансированием. В программе предусматривается восстановление и строительство 24 малых гидроэлектро-

станций общей мощностью более 200 МВт, что для нашей Республики очень много. В ней ставится задача перехода к сооружению ГЭС с единичной мощностью более 10 МВт. В настоящее время идет строительство первого такого объекта – Гродненской ГЭС на р. Неман и завершено проектирование Полоцкой ГЭС на р. Западная Двина.

Как видно из приведенной выше таблицы, выполнение программ идет успешно.

*УДК 621.22*

Г.Г. Круглов, Н.Н. Линкевич (БНТУ)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСБРОСНОГО СООРУЖЕНИЯ ПОЛОЦКОЙ ГЭС**

Республика Беларусь испытывает постоянные финансовые трудности при расчете за импортируемые топливно-энергетические ресурсы. Для снижения расхода органического топлива на производство электрической энергии существует несколько путей. Один из них - развитие гидроэнергетики путем строительства гидроэлектростанций малой и средней мощности.

В связи с тем, что водосбросная плотина Полоцкой ГЭС должна обеспечить пропуск значительных паводковых расходов (расчетный паводок – 3 % -й обеспеченности 3750 м<sup>3</sup>/с, поверочный – 0,5 % -й обеспеченности 5000 м<sup>3</sup>/с) пропуск льда и надежное сопряжение бьефов потребовались гидравлические исследования на физической модели для проверки пропускной способности плотины, режима сопряжения бьефов и пропуска льда.

В основе гидравлических исследований паводкового водосброса Полоцкой ГЭС лежит метод физического моделирования [1...6], цель которого воспроизведение в уменьшенном масштабе изучаемых явлений и обеспечение полного подобия натуральных и модельных явлений.

Для правильного воспроизведения одинаковой физической природы явлений должно обеспечиваться механическое подобие изучаемых явлений, т.е. их кинематическое и динамическое подо-

бия, которые выражаются в геометрическом подобии сопоставляемых явлений и траекторий движений сходственных частиц жидкости, в сохранении одинаковой ориентации в пространстве границ потока, пропорциональности и параллельности действующих в сходственных точках жидкости сил, постоянства отношений плотности по всему полю течения. Это выражается в сохранении геометрического подобия форм, распределение скоростей, давлений и других физических констант [1 ... 6].

Геометрическое подобие реализовать легко, так как нужно только сделать модель, подобную натуре. Значительно труднее осуществить во всех частях модели подобие одноименных физических параметров, для которых требуется равенство своего критерия подобия.

При моделировании безнапорных турбулентных потоков, характеризующихся наличием свободной поверхности, где движение происходит с преобладанием сил тяжести над силами сопротивления, определяющим является равенство критериев Фруда для модели и природы, т.е.

$$Fr = \frac{V_M^2}{gl_M} = \frac{V_N^2}{gl_N} = idem, \quad (1)$$

где  $V_M$  и  $V_N$  – средние скорости для сходственных живых сечений модели и природы;  $l_M$  и  $l_N$  – линейные размеры модели и природы.

Для моделирования на основе гравитационного подобия необходимо также выполнение условий квадратичного сопротивления, т.е. если поток в природе турбулентный, то он должен быть турбулентным и на модели, тогда силы вязкости не оказывают заметного влияния. Режим движения потока характеризуется критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{V_M \cdot l_M}{\nu} = \frac{V_N \cdot l_N}{\nu}, \quad (2)$$

где  $\nu = \nu_m = \nu_n$  – кинематический коэффициент вязкости жидкостей на модели и в натуре, которые принимаются одинаковыми, считая, что на модели и в натуре используется одна и та же жидкость.

При этом число Рейнольдса на модели сравнивается с критическим числом Рейнольдса  $Re_{кр}$ .

Для открытых потоков при равномерном движении

$$Re = \frac{VR}{\nu} = \frac{Vh}{\nu}, \quad (3)$$

где  $R$  – гидравлический радиус:

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (4)$$

$\omega$  – площадь поперечного сечения потока,  $\chi$  – смоченный периметр.

Критическое значение числа Рейнольдса для открытых русел считается равным  $Re_{кр} = 800 \dots 900$ . Для турбулентных потоков должно соблюдаться условие

$$Re > Re_{кр}. \quad (5)$$

Для модели и натуре также должны быть равны значения коэффициентов гидравлического трения

$$K_m = K_n = idem \quad (6)$$

или

$$C_m = C_n = idem, \quad (7)$$

где  $C$  – коэффициент Шези.

Пересчет параметров с модели на натуре при этом будет вестись по зависимостям:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{линейных размеров } \ell_H = \ell_M \cdot \lambda; \\ \text{площадей} & \omega_H = \omega_M \cdot \lambda; \\ \text{уклонов} & J_H = J_M; \\ \text{скоростей} & V_H = V_M \cdot \lambda^{0,5}; \\ \text{расходов} & Q_H = Q_M \cdot \lambda^{0,5}, \end{array} \right. \quad (8)$$

где  $\lambda$  – масштаб моделирования.

Кинематический коэффициент вязкости воды при средней ее температуре в лабораторных условиях 12 °С равен

$$\nu = 0,0124 \text{ см}^2 / \text{с}.$$

Масштаб моделирования  $\lambda$  выбирается исходя из возможностей лаборатории (плановых и высотных размеров гидравлического лотка, величины расхода лабораторной насосной установки и т.д.).

Плотина с безвакуумным водосливом, построенным по координатам Кригера-Офицера при профилирующем напоре на гребне равным 6,0 м.

В соответствии с заданием на проведение исследований необходимо промоделировать пропуск поверочного расхода 0,5 %-ой обеспеченной, расчетного расхода 3 %-ой обеспеченности и пропуск расхода через затворы высотой 4 м, установленные на гребне водосливной плотины, при отметке в верхнем бьефе равной НПУ.

Поверочный паводковый расход обеспеченностью 0,5 % равный 5000 м<sup>3</sup>/с должен проходить при уровне воды в нижнем бьефе 121,80 м. При отметке дна водобойного колодца 105,0 м необходимая высота сооружения, которая должна быть представлена на модели составляет минимум 17 м. Гидравлические исследования проводятся для одного водосливного пролета плотины, шириной 12,0 м при наличии двух полубычков, шириной по 1,5 м каждый. В бычках устраиваются пазы для затворов глубиной 0,7 м и шириной 1,50 м. Аналогичные пазы устраиваются и со стороны нижнего бьефа. Один пролет водосливной плотины должен пропускать расход равный 500 м<sup>3</sup>/с.

В соответствии с вышеперечисленными размерами водосливного пролета, максимальным расходом воды, глубинами в верхнем и нижнем бьефах, а также размерами гидравлического лотка и расходами насосной установки гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета был определен масштаб моделирования, который принят равным 1:47. Далее необходимо найти величину расчетного расхода на модели, соответствующую ему глубину потока на опытной установке и проверить условие (5), при соблюдении которого справедливо моделирование по закону подобия Фруда.

С учетом масштаба моделирования расход, который должен проходить через водосливной пролет плотины на модели, равен

$$Q_M = \frac{Q_H}{\lambda^{2,5}}, \quad (9)$$

где  $\lambda = 47$  – масштабный коэффициент;

$Q_H$  – расход, принятый расчетным при пропуске через один пролет плотины.

При пропуске расхода 0,5 % обеспеченности через один пролет проходит 500 м<sup>3</sup>/с. Этому расходу на модели будет соответствовать расход, определяемый по зависимости (9).

$$Q_{M,0,5\%} = \frac{500}{47^{2,5}} = 0,033016 \text{ м}^3/\text{с} = 33,016 \text{ л/с}.$$

Глубина потока в натуральных условиях в нижнем бьефе 15,8 м, а на модели будет равной

$$H_M^{\text{НБ}} = \frac{15,8 \text{ м}}{47} = 0,3362 \text{ м}$$

Тогда число Рейнольдса на модели в нижнем бьефе, где изучаются гидравлические явления

$$Re_{0,5\%} = \frac{VR}{\nu},$$

где скорость  $V = \frac{Q_{M,0,5\%}}{\omega}$ ,

площадь живого сечения нижнего бьефа  $\omega = v_{л} H_{M}^{НБ}$ ,

$v_{л}$  – ширина гидравлического лотка,  $v_{л} = 32,5$  см

$$V = \frac{33016}{32,5 \cdot 33,62} = 30,22 \text{ см/с}.$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{32,5 \cdot 33,62}{2 \cdot 33,62 + 32,5} = 10,95 \text{ см}.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{0,5\%} = \frac{30,22 \cdot 10,9}{0,0124} = 26686,2 > Re^{кр} = 900.$$

Следовательно, условие (5) соблюдается и возможно моделирование по критерию Фруда.

Расчетный паводковый расход 3 % – й обеспеченности равен  $3750 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тогда через один пролет должен пропускаться расход  $Q_{3\%} = 375 \text{ м}^3/\text{с}$ . Этому расходу на модели будет соответствовать расход, вычисленный как

$$Q_{M3\%} = \frac{375}{47^{2,5}} = 0,024762 \text{ м}^3/\text{с} = 24,76 \text{ л/с}.$$

Глубина воды в нижнем бьефе в натуре равна 14,3 м, а на модели

$$H_M^{\text{НБ}} = \frac{14,3 \text{ м}}{47} = 0,3043 \text{ м},$$

$$V = \frac{24762}{32,5 \cdot 30,43} = 25,04 \text{ см/с},$$

$$R = \frac{32,5 \cdot 30,43}{2 \cdot 30,43 + 32,5} = \frac{988,975}{93,36} = 10,59 \text{ см},$$

$$\text{Re}_{3\%} = \frac{25,04 \cdot 10,59}{0,0124} = 21384,97 > \text{Re}^{\text{кр}} = 900.$$

И для этого расхода условие (5) соблюдается.

Для третьего случая на гребне водосливной плотины устанавливается затвор высотой 4 м и шириной 1,2... 1,4 м, что соответствует модельным размерам: высота 8,52 см, ширина 2,5 см. Для этих условий и при отметке верхнего бьефа, равной НПУ = 118 м, на модели проходит расход  $Q_M = 3,60595$  л/с, что соответствует расходу в натуральных условиях  $Q_H = 54,609$  м<sup>3</sup>/с.

По заданию для этого режима отметка уровня воды в нижнем бьефе 109,4 м, т.е. глубина воды в нижнем бьефе равна 3,4 м, что соответствует глубине воды на модели

$$H_M^{\text{НБ}} = \frac{3,4 \text{ м}}{47} = 0,0723 \text{ м},$$

$$V = \frac{3605,95}{32,5 \cdot 30,43} = 3,646 \text{ см/с},$$

$$R = \frac{32,5 \cdot 7,23}{2 \cdot 7,23 + 32,5} = \frac{234,975}{46,96} = 5,0 \text{ см},$$

$$Re = \frac{3,646 \cdot 5,0}{0,0124} = 1470,2 > Re^{кр} = 900.$$

Таким образом, для всех трех случаев, для которых будут выполняться гидравлические исследования, поток в нижнем бьефе будет турбулентный, так как расчетные значения числа Рейнольдса больше его критического значения. А это означает, что моделирование водосливной плотины Полоцкой ГЭС должно осуществляться в соответствии с критерием Фруда.

При подборе материалов для изготовления модели исходили из того, что плотина возводится из бетона, что в натуре перед сооружением и за ним укладываются железобетонные плиты, для которых коэффициент шероховатости может быть принят  $n_n = 0,014 \dots 0,017$ . Для геометрически подобной модели, которая в  $\lambda$  раз меньше натуре, коэффициент шероховатости материала модели  $n_m$  должен быть меньше в  $\delta_m$  раз коэффициента шероховатости натуре

$$n_m = \frac{n_n}{\delta_n}, \quad (10)$$

где  $\delta_n = \delta^y$  – масштабный множитель коэффициента шероховатости;

$\delta = \lambda$  – линейный масштабный множитель;

$y$  – показатель степени в формуле Н.Н. Павловского, который приблизительно можно определить по формуле

$$y = 1,3 \cdot \sqrt{n_n}. \quad (11)$$

Масштабный множитель  $\delta = \lambda = 47$ . После этого определялись коэффициенты шероховатости модели  $n_m$ , значения которых приведены в таблице 1.

Таким образом, железобетонным и бетонным конструкциям реальной плотины на модели соответствуют гладкие поверхности с коэффициентом шероховатости  $n = 0,0077 \dots 0,0089$ . Согласно [1 ...6]

такие поверхности могут быть изготовлены из тщательно ошпунтованных досок, покрытых эмалевой краской.

Таблица 1 – Определение коэффициентов шероховатости модели

$n_n$	$y$	$\delta_n = \delta^y$	$n_m$
0,014	0,154	1,81	0,00773
0,017	0,169	1,92	0,00886

Модель одного пролета водосливной плотины была изготовлена в масштабе 1 : 47 (рисунок 1). По вырезанному из картона шаблону тщательно выверялись геометрические размеры модели, выполненной из дерева. Отдельно изготавливались два полубычка и все элементы соединились между собой. Все грани плотины и полубычков зачищались наждачной бумагой, шпаклевались и покрывались эмалевой краской.

В собранном виде модель водосливной плотины устанавливалась в гидравлическом зеркальном лотке шириной 32,5 см и длиной 11 м. Расстояние от оголовка мерного водослива на входе в лоток до модели принято около 5 м, а до выхода из лотка – около 6 м. Таким образом, вход и выход из лотка не оказывали влияния на режимы потока в верхнем и нижнем бьефах модели.

В нижнем бьефе водосливной плотины устраивался водобойный колодец глубиной 2,13 см и длиной 25,63 см. Съёмной доской, соответствующих размеров, водобойный колодец мог закрываться, образуя сопряжение водосливной поверхности

непосредственно с дном отводящего канала. Таким образом, моделировалась работа водосливной плотины без водобойного колодца.

Отводящий и подводящий каналы выполнялись в виде пола из деревянных досок на всю ширину лотка.

Все высотные размеры опытной установки выставлялись относительно отметки гребня водослива, который устанавливался по уровню, строго горизонтально.

Очертание водосливной поверхности модели было выполнено по координатам Кригера-Офицера.

Для моделирования процесса пропуска льда через водосливную

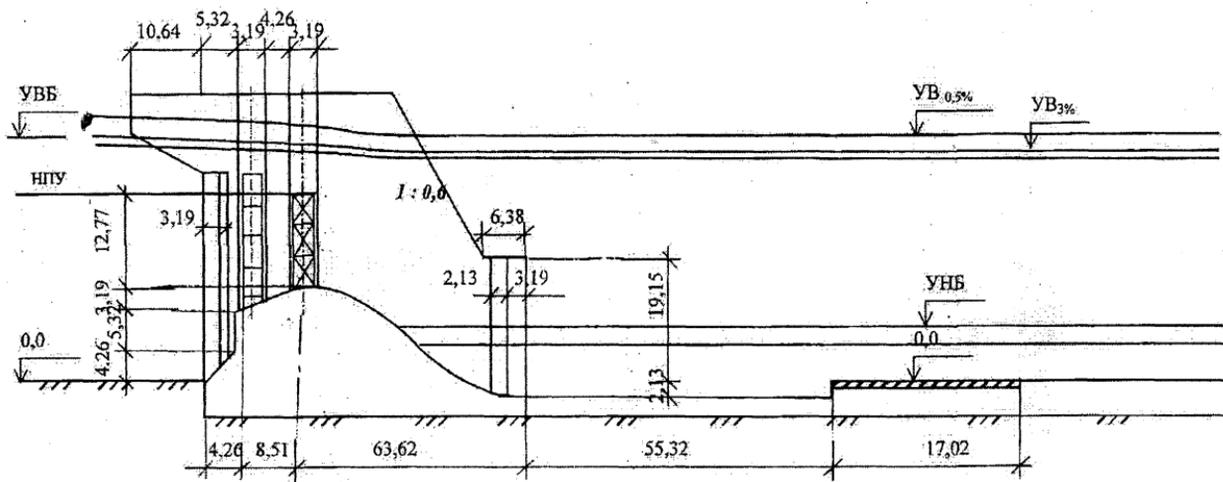


Рисунок 1 – Опытная схема установки

плотину и оценки сил, возникающих при контакте льда с сооружением необходимо, прежде всего, выдержать геометрическое подобие, уменьшив все размеры в  $\lambda$  раз. Кроме того, материал, заменяющий на модели лед, должен иметь прочность и модуль упругости в  $\lambda$  раз меньше природного льда [4, 7... 10]. Однако, моделирование процессов разрушения льда осуществить достаточно сложно.

Поэтому моделирование пропуска льда через сооружение и особенно возникающих сил взаимодействия может дать лишь качественную картину явления с достаточно грубым приближением к натуре [10].

При выборе материала, заменяющего лед на модели, испытывались парафин, воск, технический жир, нафталин, древесные опилки, пропитанная вата, смеси этих материалов, склеенные деревянные пластинки и пластинки из полимерных материалов, ослабленные ледяные пластины и лед пониженной прочности.

В связи с тем, что ставилась задача качественной оценки процесса пропуска льдин, в опытах использовался искусственно замороженный лед размером в плане  $20 \times 20$  см и толщиной около 1,6 см, что соответствовало натурным размерам льда  $10 \times 10$  м и толщине льда 75 см.

Результаты гидравлических исследований позволили установить, что:

1. Расчетный паводок 3 % -ой обеспеченности проходит при отметке верхнего бьефа 120,8 м, а поверочный паводковый расход 0,5 % -ой обеспеченности - при отметке ФПУ = 122,4 м.

2. Сопряжение бьефов при пропуске расчетного и поверочного паводковых расходов, а также при переливе потока через шандронное заграждение высотой 4 м происходит при затопленном гидравлическом прыжке.

3. В связи с тем, что придонные скорости потока на сходе с рисбермы при отсутствии водобойного колодца увеличиваются на 25 ... 30 %, а также в связи с тем, что исследованы не все возможные схемы открытия затворов, рекомендуется устройство за водосливной плотиной водобойного колодца глубиной 1 м.

4. Пропуск льда через шандронное заграждение высотой 4 м при отметке верхнего бьефа равной НПУ = 112 м сопровождается ударами льдин по водосливной поверхности плотины, задержанием

льдин в зоне гидравлического прыжка с периодическими ударами по водосливной поверхности и поверхности водобоя.

Для увеличения дальности отброса струи, и предотвращения ударов льдин о водосливную поверхность плотины рекомендуется устройство на шандорном загораждении клапана высотой 1...1,5 м с плавным криволинейным очертанием его водосливной поверхности.

Во избежание задержки льдин в зоне гидравлического прыжка и предотвращения ударов о водосливную поверхность плотины и поверхность водобоя, пропуск льда необходимо начинать при глубине потока в нижнем бьефе не менее 5 м, т. е. при отметке уровня нижнего бьефа 111 м и выше.

Результаты исследований использованы при разработке архитектурного проекта гидроузла Полоцкой ГЭС на реке Западная Двина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П.Г. Киселева. – М: Энергия, 1972. – 312 с.
2. Леви, И.И. Моделирование гидравлических явлений. – Л.: Энергия, 1967. – 210 с.
3. Ляхтер, В.М., Прудовский, А.М. Гидравлическое моделирование. – М: Энеоатомиздат, 1984.
4. Шарп, Д.Ж. Гидравлическое моделирование. – М.: Мир, 1984.
5. Агроскин, И.И., Дмитриев, Г.Т., Пикалов, Ф.И. Гидравлика. – М. – Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
6. Зегжда, А.П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. М. – Л.: Госстройиздат, 1938. – 164 с.
7. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. – М.: Высшая школа, 1966.
8. Панфилов, Д.Ф. Моделирование давления и пропуска льда. Известия Вузов. Строительство и архитектура. 1964. № 7. – С. 115-122.
9. Петруничев, Н.Н. О динамическом давлении льда на гидротехническое сооружение. Льдотермические вопросы в гидроэнергетике. – М. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – С. 17-64.
10. Под редакцией Коржавина, К.Н. Пропуск льда через гидротехнические сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 182 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВДОЛЬ КОЛЛЕКТОРА С РАВНОМЕРНОЙ РАЗДАЧЕЙ РАСХОДА ПО ДЛИНЕ

При теплотехническом проектировании системы подпочвенного обогрева важнейшим параметром является определение температуры теплоносителя по длине трубопроводов.

Температура теплоносителя вдоль обогревательного трубопровода (ось  $Z$ ) в таких системах (рисунок 1) может быть рассчитана по формулам, приведенным в [1, 2, 6]. Однако, методы, изложенные в [1, 2, 6] справедливы только для случая постоянного расхода жидкости в трубопроводе и, следовательно, не могут быть использованы для определения температуры теплоносителя коллектора (ось  $X$ ), так как по его длине происходит раздача расхода. Для равномерного нагрева всей площади обогреваемого поля по длине коллектора в единицу времени в каждый обогревательный трубопровод должно отсоединяться одинаковое количество теплоносителя с одинаковой температурой, поэтому нами была поставлена задача получить аналитическое решение для расчета температуры теплоносителя вдоль коллектора с равномерной раздачей расхода.

Рассмотрим коллектор из последовательно соединенных труб различных диаметров и длин, уложенный ниже пахотного слоя, по которому пропускается теплоноситель – вода (рисунок 2а). В общем случае материал труб может быть различным.

Заданы расход, диаметры труб и длины участков. По коллектору, составленному из последовательно соединенных труб, происходит непрерывное равномерное отделение расхода по длине. Заданный режим отделения воды по длине коллектора обеспечивается путем изменения его диаметра по длине.

Требуется определить изменение температуры воды по длине коллектора.

На участке 0-1 выделим элемент бесконечно малой длины  $dX$  (рисунок 2б). Причем допускаем, что элемент расположен в грунте, температура и параметры которого постоянны, а физические свойства теплоносителя (воды) в трубе (теплоемкость, вязкость и плотность) по длине практически не изменяются.

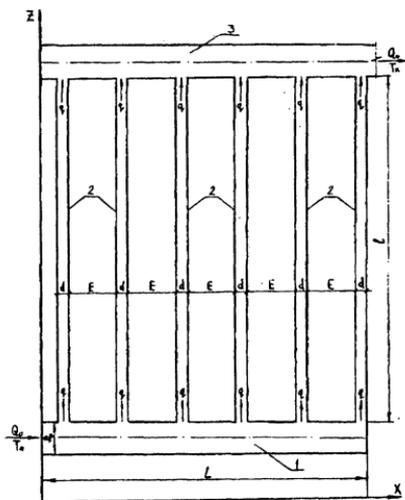


Рисунок 1 – Схема системы подпочвенного обогрева:  
 1 – коллектор-распределитель; 2 – трубы-обогреватели;  
 3 – коллектор-сборник

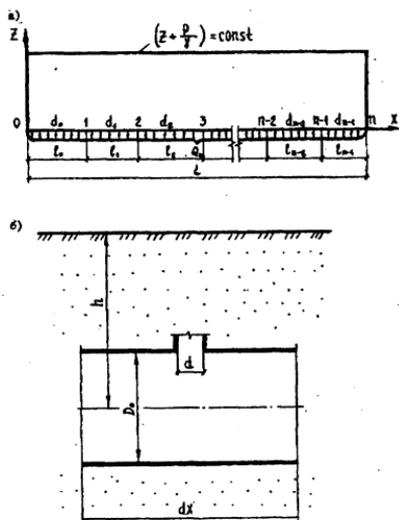


Рисунок 2 – Расчетная схема

Уравнение теплового баланса выделенного элемента  $dX$  будет иметь вид

$$FC_B \frac{\partial T}{\partial \tau} dx \cdot d\tau = F\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} dx \cdot d\tau - \frac{\partial}{\partial X} (C_B \cdot QT) dx \cdot d\tau + C_B \frac{\partial Q}{\partial X} T \cdot dx \cdot d\tau - \frac{T - T_B}{R_T} \cdot dx \cdot d\tau, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь коллектора;

$C_B$  – удельная теплоемкость воды;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воды;

$Q$  – расход воды в коллекторе;

$T$  – температура теплоносителя (воды);

$T_B$  – температура воздуха;

$R_T$  – термическое сопротивление передаче тепла от единицы длины коллектора в грунт, определяемое по зависимости [5]:

$$R_T = \frac{1}{2\pi\lambda_{ГР}} \ln \left[ \frac{2h}{D} + \sqrt{\left(\frac{2h}{D}\right)^2 - 1} \right], \quad (2)$$

где  $\lambda_{ГР}$  – коэффициент теплопроводности грунта;

$D$  – диаметр трубопровода;

$h$  – заглубление до оси коллектора, вместо которого по реко-

мендациям [4], надо подставить в (2)  $h_{эке} = h + \frac{\lambda_{ГР}}{\alpha}$ ;

$\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи грунта воздуху путем конвекции, радиации и испарения;

$\tau$  – время.

При этом, следуя [3], полагали, что влияние изменения температуры на участке  $dX$  на теплопередачу трубы в грунт не велико и им можно пренебречь.

Если процесс стационарен, и пренебречь теплопроводностью вдоль оси  $X$ , то уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial X} (C_B QT) + C_B \cdot \frac{\partial T}{\partial X} \cdot T - \frac{T - T_B}{R_T} = 0. \quad (3)$$

После некоторых преобразований имеем

$$C_B \cdot Q \cdot \frac{\partial T}{\partial X} - \frac{T - T_B}{R_T} = 0. \quad (4)$$

Разделив выражение (4) на  $C_B Q$ , получим

$$\frac{dT}{dX} + \frac{T - T_B}{C_B R_T Q} = 0. \quad (5)$$

Обозначив  $\theta = T - T_B$ , получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка, частное решение которого при условии  $\theta_{x=0} = \theta_0$  дает в общем виде функцию распределения температуры по длине участка 0-1:

$$\theta_{01} = \theta_0 \cdot \exp \left[ -\frac{1}{C_B} \int_0^{X_{01}} \frac{dx}{R_{T0} Q} \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что падение температуры теплоносителя по длине участка 0-1 коллектора, уложенного в грунт, определяется характером изменения расхода теплоносителя и термическим сопротивлением передачи тепла в грунт на этом участке коллектора.

При непрерывном равномерном отделении воды расход в любом сечении коллектора

$$Q(\bar{X}) = Q_0 \cdot (1 - \bar{X}), \quad (7)$$

где  $Q_0$  – расход воды в начальном сечении коллектора;

$\bar{X}$  – состояние от начального до рассматриваемого сечения коллектора, отнесенное ко всей длине коллектора  $L$  ( $0 < \bar{X} < 1$ ).

Подставив зависимость (7) в (6), получим

$$\theta_{01} = \theta_0 \cdot \exp \left[ -\frac{L}{C_B Q_0} \int_0^{\bar{X}_{01}} \frac{d\bar{X}}{R_{T0}(1 - \bar{X})} \right]. \quad (8)$$

После интегрирования (8) при  $R_{T0} = \text{const}$ , получаем для участка 0-1 коллектора

$$\theta_{01} = \theta_0 \cdot \exp \left[ \frac{L}{C_B R_{T0} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{01}}| \right], \quad (9)$$

где  $\theta_0 = T_0 - T_B$ ;

$T_0$  – температура поверхности коллектора в начальном сечении, практически равная при водяном обогреве температуре теплоносителя.

Окончательно уравнение для определения температуры теплоносителя (воды) в сечении коллектора  $0 \leq \overline{X_{01}} \leq \overline{\ell_0}$ , уложенного в грунт, с равномерной раздачей по длине примет вид

$$T_{01} = (T_0 - T_B) \cdot \exp \left[ \frac{L}{C_B R_{T0} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{01}}| \right] + T_B \quad (10)$$

Используя (5), можно найти соответственно для остальных участков коллектора

$$\left. \begin{aligned} T_{12} &= (T_1 - T_B) \cdot \exp \left[ \frac{L}{C_B R_{T1} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{12}}| \right] + T_B; \\ T_{23} &= (T_2 - T_B) \cdot \exp \left[ \frac{L}{C_B R_{T2} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{23}}| \right] + T_B; \\ T_{[(n-1)-n]} &= (T_{n-1} - T_B) \cdot \exp \left[ \frac{L}{C_B R_{T(n-1)} Q_0} \ln |1 - \overline{X_{[(n-1)-n]}}| \right] + T_B; \\ T_{[(n-1)-n]} &= T_n \text{ при } \overline{X_{[(n-1)-n]}} = \overline{\ell_{n-1}} = \frac{\ell_0 + \ell_1 + \dots + \ell_{n-1}}{L}, \end{aligned} \right\} (11)$$

где  $T_1, T_2, \dots, T_n$  – температура поверхности трубы соответственно в конце нулевого, первого и  $n-1$  участков коллектора;

$R_{T0}, R_{T1}, \dots, R_{T(n-1)}$  – термическое сопротивление передачи тепла от трубы в грунт соответственно на участке коллектора 0-1, 0-2 и  $[(n-1)-n]$ .

Таким образом, изменение температуры воды вдоль коллектора, уложенного в грунт, с равномерной раздачей по длине можно произвести по формулам (10) и (11).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аронов, С.Н. Определение глубины заложения водоводов. – М.: Стройиздат, 1950.
2. Иоффе, И.А. Влияние уклона труб и температуры теплоносителя на тепловой режим почвы // Механиз. и электрифик. сельск. хоз-ва, 1972. – № 7. – С. 42-43.
3. Куртнер, Д.А., Усков, И.Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом и защищенном грунте. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 232 с.
4. Кутателадзе, С.С., Рабинович, А.Л. Расчет почвенного обогрева теплиц // Отопление и вентиляция, 1935, – № 12. – С. 19-23.
5. Шубин, Е.П. О тепловых потерях трубы, уложенной в грунт// Известия ВТИ, М.: Энергоиздат, 1934. – № 4. – С. 43-56.
6. Kendrick, J., Havens, J. Heat transfer models for a subsurface water pipe soil warming system // J. Environ. Qual., 1973. – V.2. – P.188-190.

Г.В. Соколовский (РУП "Белгипроводхоз"), В.И. Селезнев,  
Н.Н. Линкевич (БНТУ), А.В. Высоченко,  
Ж.А.Капилевич (РУП "Институт мелиорации")

## **ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ОСУШЕНИЮ ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ПОНИЖЕНИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕМЛЯХ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ**

В составе сельскохозяйственных угодий Республики Беларусь доля осушенных земель достигает 31,7 % (таблица 1) [1]. Однако по данным проведенной концерном Белмелиоводхоз инвентаризации (1997-1999 гг.) мелиоративные системы на площади 760 тыс. га не соответствуют запроектированным параметрам и нуждаются в реконструкции. По некоторым оценкам, ежегодный суммарный недобор урожаев на мелиорированных землях от неудовлетворительного водного режима превышает 1 млн. т кормовых единиц [2]. В связи с этим задача обеспечения эффективного использования мелиорированных земель на основе применения современных методов, технологий и проектно-конструкторских решений имеет особо высокую значимость. Существенные объемы работ по реконструкции мелиоративных систем предопределяют необходимость разработки и реализации принципов типового проектирования на строго научной основе.

За время, прошедшее после ввода в эксплуатацию, произошло старение мелиоративных систем, а также значительная трансформация водно-физических свойств осушенных почв, изменился микро- и мезорельеф осушенных территорий. Это в свою очередь обусловило изменение водного режима, переувлажнение и застой поверхностных вод в понижениях, развитие процессов интенсивного вторичного заболачивания, частичное зарастание сорной и древесно-кустарниковой растительностью, снижение и потери урожаев сельскохозяйственных культур.

Негативное влияние переувлажненных понижений на сельскохозяйственных угодьях, особенно на пашне, проявляется в угнетении и гибели посевов из-за переувлажнения, а также в нарушении оптимальных сроков механизированной обработки полей, а в отдельные

годы – в невозможности такой обработки, что способствует образованию и распространению очагов сорной и древесно-кустарниковой растительности.

Таблица 1 – Площади осушенных земель

Земли	Площадь земель, тыс. га			
	Республика Беларусь	Витебская область	Глубокский район	Сенненский район
Сельскохозяйственные	9204,8	1634,3	96,1	90,4
из них пахотные	5761,2	931,4	52,4	47,3
Осушенные сельскохозяйственные	2920,9	524,6	27,8	27,5
из них пахотные	1270,0	339,5	16,6	16,5

Анализ материалов предпроектных почвенно-мелиоративных изысканий на объектах реконструкции, выполненных специалистами РУП «Белгипроводхоз», показал, что наиболее часто встречающимися факторами неблагополучия на мелиорированных землях являются следующие:

- заиление и деформация открытых каналов с частичным обрушением откосов,
- заиление дренажа и устьев коллекторов,
- зарастание открытых каналов влаголюбивой травяной и древесно-кустарниковой растительностью,
  - некачественное разравнивание кавальеров,
  - неудовлетворительная организация поверхностного и внутрипочвенного стока,
  - просадочные явления,
  - отсутствие или некачественная организация поверхностного стока из кюветов дорог, примыкающих к мелиоративным объектам,
  - разрушение дренажных и коллекторных трубок,
  - разрушение устьев дренажных систем,

- уплотнение подпахотного горизонта.

Указанные факторы, как правило, присутствующие на одном объекте в комплексе, приводят к возникновению на мелиорированных землях многочисленных мест постоянного или продолжительного застоя поверхностных вод. Непринятие соответствующих мер может привести к увеличению таких площадей вследствие ежегодных недопашек по контуру переувлажнения из-за непроходимости техники.

В 2004-2006 гг. нами совместно со специалистами предприятий, эксплуатирующих мелиоративные системы, и агрономами сельскохозяйственных предприятий было проведено обследование состояния мелиорированных земель Глубокского и Сенненского районов Витебской области, природные условия которых наиболее характерны для холмисто-моренно-озерных ландшафтов Белорусского Поозерья [3]. Выбор районов был обусловлен высокой долей осушенных земель в составе пахотных угодий районов (31,7 и 34,8 %, соответственно), а также тем, что в этих районах специалистами РУП «Институт мелиорации» ведутся стационарные наблюдения за работой мелиоративных систем и урожайностью сельскохозяйственных культур на осушенных землях (таблица 2). Полевое обследование состояния мелиорированных земель включало фиксацию, плановую привязку, определение морфометрических характеристик переувлажненных понижений, описание растительного покрова, изучение почвенного покрова путем описания почвенных разрезов в характерных понижениях, учеты урожая сельскохозяйственных культур. Кроме того, нами использовались фондовые материалы РУП «Институт мелиорации» и сельскохозяйственных организаций.

В Глубокском районе 60,8 % выявленных переувлажненных понижений расположено на дерново-подзолистых заболоченных супесчаных и супесчаных почвах, подстилаемых на глубине менее 1 м моренными отложениями. Они имеют преимущественно небольшие размеры, 31 % всех переувлажненных понижений имеет площадь от 0,01 га до 0,5 га. На осушенных торфяных почвах отмечено 32 % выявленных понижений. Значительная часть понижений на мелиорированных землях Глубокского района обрабатывается ежегодно (42,3 %), однако около 15% понижений обрабатывается реже 1 раза в 4 года. Положение осложняется тем, что происходит интенсивное нарастание таких понижений кустарниковой и древесной расти-

тельностью. Так, в настоящее время выявлено 24 % в разной степени заросших древесно-кустарниковой растительностью переувлажненных понижений от общего их количества.

Таблица 2 – Объемы работ по изучению состояния мелиорированных земель Белорусского Поозерья

Административные районы	Количество обследованных мелиоративных объектов, шт.	Количество выявленных переувлажненных понижений, шт.	Общая площадь выявленных переувлажненных понижений, га
Глубокский	57	519	986,3
Сенненский	50	356	651,8
ИТОГО:	107	875	1638,1

В Сенненском районе 75 % понижений отмечено на минеральных заболоченных почвах и 25 % – на торфяных. Большая часть переувлажненных понижений расположена на легкосуглинистых и связносупесчаных почвах (91 % всех понижений на минеральных почвах). Около 77 % понижений имеют размеры от 0,1 до 5,0 га с преобладанием понижений площадью от 1,0 до 5,0 га (33 %).

На мелиорированных землях Сенненского района отмечена высокая степень зарастания понижений древесно-кустарниковой растительностью (45 %). Здесь ежегодно обрабатывается только 22 % переувлажненных понижений, что связано с преобладанием понижений с длительным и постоянным застоем поверхностных вод.

Приведенные данные отражают глубокие природно-генетические различия переувлажненных понижений на мелиорированных землях, обусловленные особенностями строения почвенного профиля и различиями в гидрогеологических условиях. Следует отметить, что количество переувлажненных понижений на мелиоративных объектах, их морфометрические характеристики и возможности использования в сельскохозяйственном производстве зависят не только от природных особенностей территории, но и от состава примененных гидротехнических и агро-мелиоративных ме-

менение дополнительных мероприятий, состав и параметры которых обусловлены характерными (типовыми) особенностями сформировавшихся на данной территории очагов застоя поверхностных вод или длительного переувлажнения почвы, позволит решить стоящую проблему. Сугубо технических и практических ограничений нет. В этой связи можно и необходимо говорить только о степени сложности предлагаемых технических решений и экономической эффективности их реализации.

Выполненная нами формализация и параметризация основных атрибутивных признаков переувлажненных понижений на мелиорированных минеральных землях Белорусского Поозерья позволила разработать принципы их типизации и дать детальную характеристику типов понижений, что может быть использовано в целях максимальной унификации проектных решений при реконструкции и восстановлении мелиоративных систем, т.е. при разработке комплексов практических решений для устранения застоя поверхностных вод и избыточного увлажнения почв [4]. В таблице 3 представлены диагностические признаки переувлажненных понижений на мелиорированных минеральных землях в соответствии с выполненной типизацией.

Анализ сложившейся практики применения технических решений при реконструкции мелиоративных систем на минеральных землях Белорусского Поозерья показал, что основными способами решения проблемы локального избыточного увлажнения мелиорированных земель являются сгущение дренажа, применение фильтрующих засыпок, устройство и восстановление существующих колодцев- и колонок-поглотителей, выполнение мероприятий по организации поверхностного стока [5-8]. Однако при их применении не учитываются существующие различия и подобие переувлажненных понижений.

Выполненная типизация и приведенные диагностические и описательные признаки переувлажненных понижений делают возможным в некоторой степени формализовать процесс проектирования мероприятий по ликвидации переувлажненных участков на мелиоративных объектах с целью гомогенизации водного режима осушаемых территорий. Учитывая различия выделенных типов понижений, их мелиоративные особенности, морфологические характеристики, водный режим, условия водного питания и др., предлагаются дифференцированные способы (схемы) их осушения (таблицы 4, 5).

Таблица 3 – Диагностические признаки переувлажненных понижений на мелиорированных землях в условиях холмисто-моренно-озерных ландшафтов

Тип	Место положение	Почвы	Морфометрия (по преобладанию)			Наличие поверхностных вод	Периодичность сельскохозяйственного использования	Заращение сорной, болотной и кустарниковой растительностью
			глубина, м	площадь, га	форма			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Среди дерново-подзолистых временно избыточно увлажненных и глееватых супесчаных почв, подстилаемых песками на глубине до 0,5 м и суглинком глубже 1 м.	Дерновые временно избыточно увлажненные рыхло-супесчаные, подстилаемые с глубины до 0,5 м песком и моренным суглинком глубже 1 м	До 0,2	0,1-5,0	Круглая, овальная	Нет	75 % - ежегодно 25 % - 1 раз в 2-3 года	Возможно наличие сорной растительности
II	В нижних частях пологих склонов среди массивов дерново-подзолистых	Дерново-подзолистые глееватые супесчаные почвы, подстилаемые с	0,2-0,3	0,1-1,0	Овальная, сложная	Нет	40 % - ежегодно 43 % - 1 раз в 2-3 года	Наличие сорной, болотной и кустарниковой

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	временно избыточно увлажненных супесчаных (часто рыхлосупесчаных) почв, подстилаемых моренным суглинком или слоистыми песчано-супесчаными отложениями	глубины более 0,5 м моренным суглинком							растительностью
III	В межхолмных понижениях среди массивов дерново-подзолистых глееватых супесчаных и суглинистых почв, подстилаемых с глубины менее 1 м моренным суглинком, глубже – песчаными отложениями	Дерновые глееватые супесчаные, подстилаемые с глубины 0,6-0,8 м моренным суглинком, реже – глиной	0,2-0,3	0,1-1,0	Овальная, круглая	В нижней части понижений	41 % - ежегодно 31 % - реже 1 раза в 4-5 лет	Наличие сорной, болотной и древесно-кустарниковой растительности	
IV	В тальвегах и межхолмных понижениях среди	Дерновые глееватые суглинистые, развитые	0,5-0,7	0,1-5,0	Сложная	Нет	40 % - ежегодно 48 % - 1 раз в 2-3 года	Наличие сорной, болотной	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	массивов дерново-подзолистых глееватых преимущественно суглинистых почв, развитых на делювиальных отложениях	на мощных делювиальных суглинках					11 % - 1 раз в 4-5 лет	и древесно-кустарниковой растительности
V	Среди массивов дерново-подзолистых глееватых супесчаных почв, подстилаемых преимущественно песчаными отложениями	Дерново-подзолистые глеевые супесчаные, подстилаемые с глубины 0,5-0,8 м песком, реже – песчано-супесчаными отложениями	0,3-0,5	0,5-5,0	Прямоугольная, сложная	В нижней части понижений	26 % - ежегодно 23 % - 1 раз в 2-3 года 51 % - реже 1 раза в 4-5 лет	Наличие сорной, болотной и древесно-кустарниковой растительности
VI	На слегка вогнутых участках среди широковолнистых равнин, сложенных дерново-подзолистыми глееватыми и дерново-подзолистыми глеевыми суглинистыми	Дерново-подзолистые глеевые суглинистые, подстилаемые с глубины 0,4-0,6 м моренным суглинком	0,2-0,5	0,1-1,0	Круглая, овальная	В нижней части понижений	19 % - ежегодно 26 % - 1 раз в 2-3 года 55 % - реже 1 раза в 4-5 лет	Наличие сорной, болотной и древесно-кустарниковой растительности

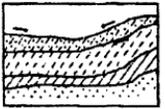
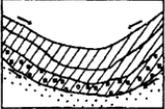
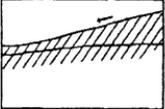
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	почвами, подсти- лаемыми с глубины менее 1 м морен- ным суглинком, глубже – песком							
VII	Среди дерново- подзолистых вре- менно избыточно увлажненных и глееватых суглини- стых почв на слои- стых песчано- супесчаных отло- жениях	Дерновые глее- вые суглинистые, подстилаемые с глубины 0,6-0,8 м песком, реже – слоистыми гли- нисто-песчано- супесчаными отложениями	0,2-0,3	0,1-1,0	Круглая	Вода заполня- ет все пониже- ние	26 % - 1 раз в 2-3 года 74 % - реже 1 раза в 4-5 лет	Наличие болотной и древес- но- кустарни- ковой расти- тельности
VIII	В межхолмных по- нижениях среди дерново- подзолистых глее- ватых и глеевых суглинистых почв	Иловато-глеевые супесчаные и суглинистые, подстилаемые с глубины 0,6-0,8 м моренным суг- линком	0,8-1,0	0,1-1,0	Круглая	Вода заполня- ет все пониже- ние	79 % - реже 1 раза в 4-5 лет 21 % не обраба- тывается	Наличие болотной и древес- но- кустарни- ковой расти- тельности

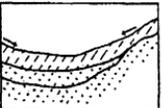
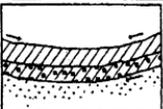
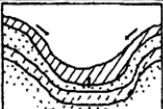
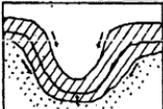
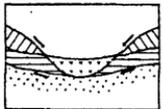
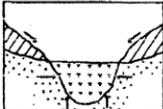
1	2	3	4	5	6	7	8	9
IX	Среди холмов, подножья которых сложены дерновыми и дерновыми глеевыми супесчаными и суглинистыми почвами	Торфяно- и торфянисто-глеевые, в том числе антропогенно преобразованные, подстилаемые с глубины 0,3-1,0 м глиной, супесью, песком, слоистыми отложениями	> 1,0	0,5-5,0	Круглая, овальная, сложная	Вода заполняет все понижение и подтапливает часть прилегающей территории	23 % - 1 раз в 2-3 года 60 % - реже 1 раза в 4-5 лет 17 % не обрабатывается	Наличие болотной и древесно-кустарниковой растительности
X	В углублениях среди массивов торфяных почв, развитых на осоково-гипновых торфах, подстилаемых песками	Торфяные среднемошные и мощные	> 1,0	0,5-10,0	Прямоугольная, овальная	Вода заполняет все понижение и подтапливает часть прилегающей территории	14 % - 1 раз в 2-3 года 61 - реже 1 раза в 4-5 лет 25 % не обрабатывается	Наличие болотной и древесно-кустарниковой растительности

Таблица 4 – Схемы осушения переувлажненных понижений

№ схемы	Наименование схемы осушения	Состав мероприятий
1	Осушение переувлажненных понижений с использованием существующей дренажной сети	Промывка существующего коллектора, заложение одиночных дрен с устройством колодцев-поглотителей или колонок-поглотителей
2	Осушение переувлажненных понижений с использованием существующей дренажной сети и устройством новых коллекторов	Заложение новых коллекторов и дрен в дополнение к существующим с устройством колодцев-поглотителей или колонок-поглотителей
3	Осушение переувлажненных понижений с помощью ложбин стока	Устройство ложбин стока с выводом их через открытые воронки стока в существующие каналы
4	Засыпка переувлажненных понижений грунтом срезаемых бугров с раскрытием в существующие каналы	Срезка бугров и засыпка понижений с раскрытием в существующие каналы через открытые воронки стока
5	Засыпка переувлажненных понижений с раскрытием в проектируемые ложбины стока	Устройство ложбин стока, срезка бугров и засыпка понижений с раскрытием в ложбины стока через открытые воронки стока
6	Устройство в понижении пруда-копани со сбросным коллектором, выведенным в существующий канал	Строительство пруда копани, устройство сбросного коллектора
7	Устройство в понижении пруда-копани со сбросным коллектором, выведенным в существующий канал, в комбинации с засыпкой понижений, устройством ложбин стока и нового дренажа с колонками-поглотителями	Строительство пруда-копани, устройство сбросного коллектора, засыпка понижений с раскрытием в пруд-копань, устройство ложбин стока и нового дренажа с колонками-поглотителями
8	Прокладка через обширные и глубокие понижения нового открытого канала в комбинации с засыпкой понижений и устройством ложбин стока	Строительство нового открытого канала, устройство ложбин стока, засыпка понижений

Таблица 5 – Состав мероприятий по осушению переувлажненных понижений в условиях холмисто-моренно-озерных ландшафтов

Тип понижения	Рельеф и литология	Преобладающий тип водного питания	Предлагаемая схема осушения
1	2	3	4
I		Атмосферное увлажнение внутрипочвенными аллохтонными водами	1
II		Атмосферное увлажнение автохтонными водами	2
III		Атмосферное увлажнение автохтонными водами	3
IV		Атмосферное водное питание аллохтонными водами	4

1	2	3	4
V		Атмосферное увлажнение автохтонными водами	2, 3
VI		Атмосферное увлажнение автохтонными водами	3, 4
VII		Смешанное водное питание аллохтонными и грунтово-напорными водами	1, 2, 3
VIII		Грунтово-напорное водное питание	5, 6
IX		Грунтово-напорное водное питание	6, 7
X		Грунтово-напорное водное питание	7, 8

Ликвидация переувлажнения понижений I типа, как правило, бывает полной и достигается с использованием существующей дренажной сети путем устройства колодцев-поглотителей, а также в случае необходимости промывки дренажа (рисунок 1).

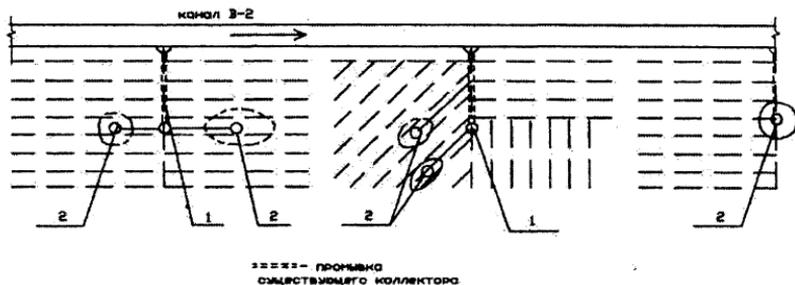


Рисунок 1 – Схема осушения переувлажненных понижений I и VII типов:  
1 – смотровой колодец; 2 – колодец-поглотитель и колонка-поглотитель

Переувлажнение неглубоких плоских понижений II типа может быть ликвидировано путем устройства нового дренажа в дополнение к существующему с устройством колодцев-поглотителей или колонок-поглотителей (рисунок 2).

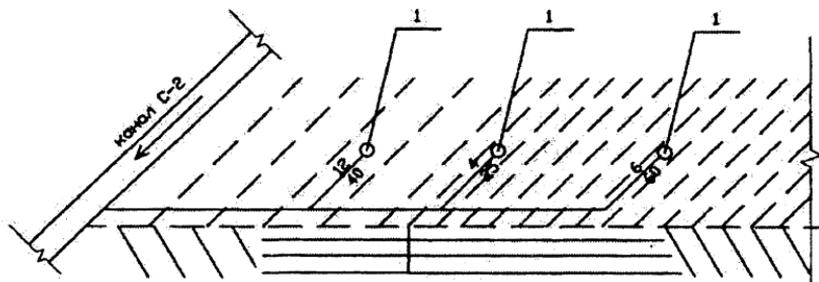


Рисунок 2 – Схема осушения переувлажненных понижений II, V и VII типов  
1 – колодец-поглотитель и колонка-поглотитель

Улучшение водного режима замкнутых межхолмных понижений III типа производится путем устройства ложбин стока с выводом их через открытые воронки в существующие каналы (рисунок 3).

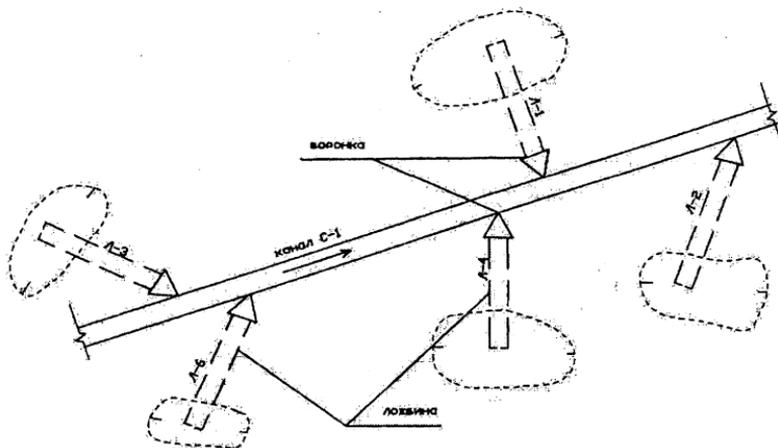


Рисунок 3 – Схема осушения переувлажненных понижений III, V, VI и VII типов

Переувлажнение глубоких вытянутых понижений IV типа, расположенных преимущественно в тальвегах, ликвидируется засыпкой понижений с выводом в существующие каналы (рисунок 4).

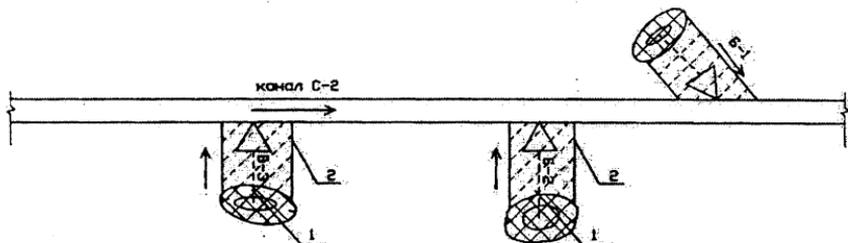


Рисунок 4 – Схема осушения переувлажненных понижений IV и VI типов:  
1 – засыпка понижения; 2 – срезка бугров; 3 – воронка для сброса воды в канал

При наличии дренажа переувлажнение обширных плоских понижений V типа ликвидируется устройством дополнительного дре-

нажа и при необходимости колодцев-поглотителей; на объектах, осушенных открытой сетью каналов, осуществляется устройством ложбин стока (рисунки 2, 3).

Переувлажнение замкнутых межхолмных понижений VI типа ликвидируется либо устройством ложбин стока при небольших глубинах понижений, либо засыпкой понижений местным грунтом (рисунки 3,4).

Переувлажнение неглубоких часто замкнутых блюдцеобразных понижений VII типа при наличии дренажа ликвидируется заложением дополнительного дренажа с водопоглощающими устройствами, а в случае осушения открытой сетью каналов – устройством ложбин стока (рисунки 1, 2, 3).

При небольших размерах понижения VIII типа засыпаются местным грунтом с выводом ложбинами в существующие каналы, при больших размерах устраивают пруды-копани (рисунки 5, 6).

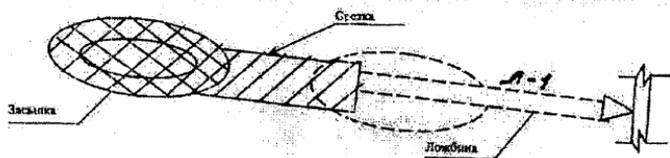


Рисунок 5 – Схема осушения переувлажненных понижений VIII типов

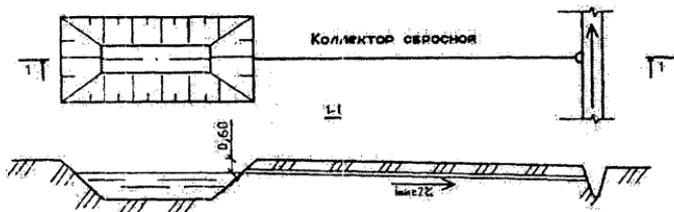


Рисунок 6 – Схема осушения переувлажненных понижений VIII и IX типов

На глубоких обширных понижениях IX типа устраивают пруды-копани с дополнительными мероприятиями (одиночные дрены, ложбины стока, колодцы-поглотители, засыпка местным грунтом,) (рисунок 7).

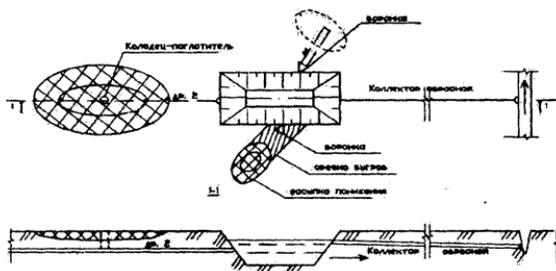


Рисунок 7 - Схема осушения переувлажненных понижений IX и X типа

Глубокие обширные понижения X типа на мощных торфяниках могут быть выведены из сельскохозяйственного использования для устройства экологических зон различного целевого назначения [9]. При невозможности исключения из сельскохозяйственного оборота для улучшения водного режима устраиваются пруды-копани или строятся новые открытые каналы с дополнительными мероприятиями (рисунки 7, 8).

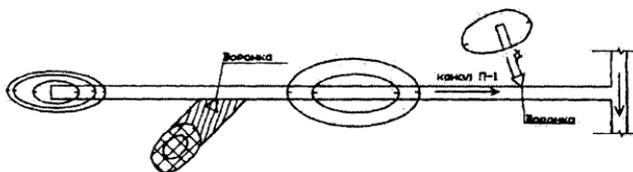


Рисунок 8 - Схема осушения переувлажненных понижений X типа

Предлагаемые схемы осушения переувлажненных понижений разных типов на мелиоративных объектах в условиях холмисто-моренно-озерных ландшафтов носят рекомендательный характер и могут быть использованы в качестве основных при проектировании объектов реконструкции мелиоративных систем, в отдельных слу-

чаях возможны некоторые изменения и дополнения с учетом конкретных почвенно-гидрогеологических условий, планируемого сельскохозяйственного использования земель и действующих нормативных документов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Земля Беларуси. 2001. Справочное пособие / Авт. И.М. Багдевич, Н.Н. Бамбалов, С.Г. Беленький [и др.]; под ред. Г.И. Кузнецова, Г.В. Дудко. – Минск, 2001. – 120 с.

2. Васильев, В.В. Современное состояние и эффективность использования мелиоративного комплекса Беларуси. Материалы международной научно-практической конференции «Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов». Часть 1. Москва, 2008. – С. 62-68.

3. Ландшафты Белоруссии / Под ред. Г.И. Марцинкевич, Н.К. Клицуновой. Минск: БГУ, 1989. – 240 с.

4. Принципы типизации понижений на мелиорированных минеральных землях в условиях низменных озерно-ледниковых ландшафтов // Мелиорация переувлажненных земель. А.В. Высоченко, [и др.]; 2006, № 2 (56). – С.57-67.

5. Руководство по осушению минеральных земель. / БелНИИ-МиВХ, ВНИИГиМ, УкрНИИГиМ, ЛитНИИГиМ, ВНИИ-водполимер, 1977. – 87 с.

6. Брусиловский, Ш.И. Организация поверхностного стока на минеральных землях. Минск: Ураджай, 1985. – 136 с.

7. Мелиорация: Энциклопедический справочник / [Редкол.: И.П. Шамякин (гл. ред.); под общ. ред. А.И. Мурашко] – Минск: Белорус. Сов. Энцикл., 1984. – 567 с.

8. Брусиловский, Ш.И., Капилевич, Ж.А., Высоченко, А.В. Повышение осушительного действия дренажа на тяжелых почвах методами структурной мелиорации // НТИ «Мелиорация и водное хозяйство», 1990, вып. 6. – С. 16-20.

9. Применение экологических мероприятий при реконструкции мелиоративных систем в условиях Белорусского Поозерья / П.М. Богославчик [и др.] // Строительная наука и техника. ТКП 45.– 2009. – № 3. – С. 41-45.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОСЛИВА КРИВОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

Двухъярусные плотины обладают рядом существенных достоинств. Их применение создают предпосылки для уменьшения объемов строительных работ за счет сокращения длины водосбросного фронта гидроузла, кроме того, они улучшают условия пропуска паводка, сброса льда, пропуска строительных расходов, позволяют уменьшить размеры и вес затворов. Донные отверстия могут быть использованы для промыва наносов, для полезных попусков, опорожнения водохранилища.

В настоящей статье рассматривается двухъярусная водосбросная плотина, ярусность которой образована плотиной практического профиля, с водосливной гранью очерченной по координатам Офицера-Кригера, донное отверстие прямоугольной формы, ее входная часть имеет прямоугольные кромки.

В практике гидротехнических расчетов, при проектировании подобного рода сооружений приходится сталкиваться:

- с подсчетами площадей поперечного сечения водосливов криволинейного очертания. Эти расчеты необходимы для определения собственного веса плотины, при статическом расчете, или для определения объемов бетонных работ.

- с определением координат точки центра тяжести водослива при статическом расчете сооружения;

- с определением угла наклона сливной кромки уступа криволинейного водослива к горизонту, в частности, это необходимо для определения действующего напора донного отверстия двухъярусной плотины, или для выяснения степени подтопляющего или эжектирующего воздействия поверхностного расхода на турбинный расход в совмещенных ГЭС.

Для определения этих характеристик геометрическим способом, необходимо в масштабе для профилирующего напора по координатам Офицера-Кригера вычерчивать поверхностный водослив

практического профиля. Очевидно, что этот способ достаточно трудоемкий и сопряжен с большими трудностями.

Определить эти характеристики аналитическим способом, до настоящего времени, не представляется возможным, так как указаний к их расчетам нет ни в нормативной, ни в справочной литературе. По этой же причине нельзя использовать и вычислительную технику.

Для того чтобы решить эти задачи необходимо:

1. Найти аналитическую зависимость для описания криволинейной поверхности водослива;
2. Найдя уравнение криволинейной поверхности водослива определить координаты кромки уступа водослива, решив найденное уравнение относительно высоты водослива  $P$ ;
3. Используя геометрический смысл двойного интеграла, определить площадь и координаты точки центра тяжести поперечного сечения водослива;
4. Используя геометрический смысл производной, продифференцировать функцию поверхности водослива в точке с координатами уступа и определить тангенс угла наклона  $\operatorname{tg}\alpha$  уступа водослива.

Прежде всего криволинейную поверхность нужно представить в виде кривой описываемой математической функцией. Для нахождения такой кривой, описывающей водосливную поверхность с профилирующим напором  $H_{\text{пр}}$ , воспользуемся методами математической статистики (рисунок 1).

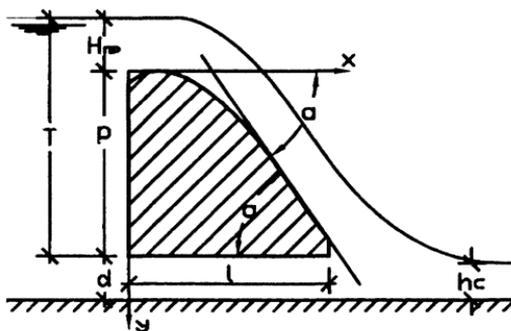


Рисунок 1 – Поперечное сечение двухъярусной плотины

В результате получается зависимость:

$$y = \left(1/H_{\text{пр}}\right) \cdot 0,3095x^2 + 0.0106x - H_{\text{пр}} 0,0256.$$

Как видно функция достаточно хорошо описывает криволинейную поверхность, коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0,9995$  весьма близок к единице.

На следующем этапе необходимо найти координаты выходной кромки уступа ( $x_0$ ;  $y_0$ ). Координата  $y_0$  известна и равна высоте водосливной плотины  $P=T - H_{\text{пр}}$ . Чтобы найти координату  $x_0 = 1$  необходимо решить квадратное уравнение относительно  $P$ .

$$T - H_{\text{пр}} = \left(1/H_{\text{пр}}\right) \cdot 0,3095x^2 + 0.0106x - H_{\text{пр}} 0,0256.$$

Значение  $T - H_{\text{пр}}$  переносится в левую часть уравнения

$$\left(1/H_{\text{пр}}\right) \cdot 0,3095x^2 + 0.0106x - H_{\text{пр}} 0,0256 - T = 0.$$

Определяется дискриминант

$$\begin{aligned} D &= 0,0106^2 - 4 \cdot \frac{1}{H_{\text{пр}}} \cdot 0,3095 \cdot (0,974 - T) = \\ &0,0001 - 1,24 \cdot \frac{T}{H_{\text{пр}}} + 1,21 \approx 1,24 \cdot \frac{T}{H_{\text{пр}}} - 1,21. \end{aligned}$$

Тогда корни уравнения можно определить из выражения

$$x = \frac{-0,0106 \pm \sqrt{1,24 \cdot \frac{T}{H_{\text{пр}}} - 1,21}}{2 \cdot \frac{1}{H_{\text{пр}}} \cdot 0,3095} = \frac{-0,0106 \pm \sqrt{D}}{2 \cdot \frac{1}{H_{\text{пр}}} \cdot 0,3095}.$$

Уравнение имеет два корня положительный и отрицательный. Значение  $x$  для решения поставленной задачи может быть только положительным, тогда получится

$$x = H_{\text{пр}} \cdot (-0,017 + 1,61\sqrt{D}).$$

Геометрический смысл двойного интеграла  $\iint_D f(x,y) dx dy$  (при условии изотропности тела водослива  $f(x,y) = 1$ ) равен площади области  $D$ , т.е.  $S_D = \iint_D dS = \iint_D dx dy$ .

Чтобы найти площадь поперечного сечения плотины нужно задаться граничными условиями (рисунки 2, 3).

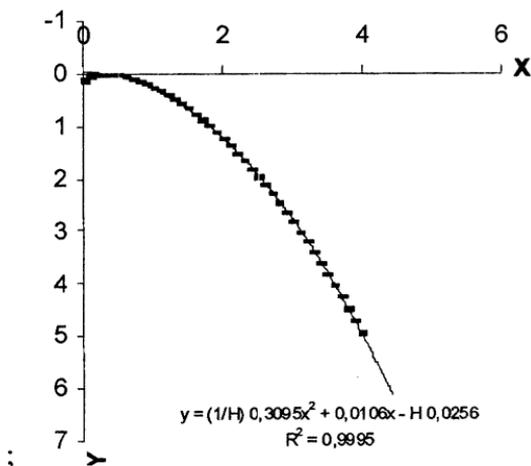


Рисунок 2 – Криволинейная поверхность безвакуумного профиля

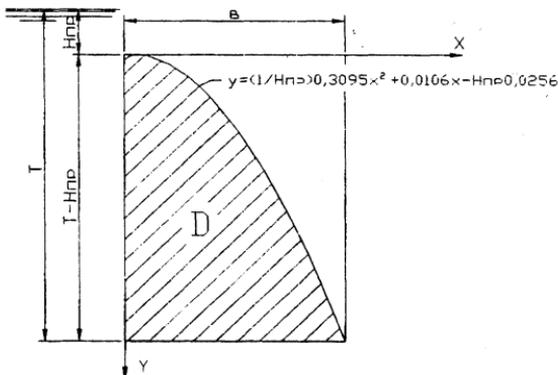


Рисунок 3 – Определение площади области D

Снизу область D ограничена прямой

$$y = T - H_{\text{пр}},$$

где T – удельная энергия верхнего бьефа относительно кромки уступа водослива;

$H_{\text{пр}}$  – профилирующий напор.

Со стороны напорной грани водослива (слева) область D ограничена линией  $x = 0$ , справа – область D, ограничена линией  $x = H_{\text{пр}}(-0,017 + 1,61\sqrt{D})$ .

Площадь D

$$S = \iint_D dx dy = \int_0^{H_{\text{пр}}(-0,017 + 1,61\sqrt{D})} dx \int_{(1/H_{\text{пр}})0,3095x^2 + 0,0106x - H_{\text{пр}}0,0256}^{T - H_{\text{пр}}} dy$$

Можно ввести обозначение

$$e = H_{\text{пр}}(-0,017 + 1,61\sqrt{D}),$$

$$\text{тогда } S = \int_0^a \left( T - H_{\text{пр}} - \left( (1/H_{\text{пр}}) \cdot 0,3095x^2 + 0,0106x - H_{\text{пр}} \cdot 0,0256 \right) \right) dx.$$

Взяв интеграл, можно определить площадь поперечного сечения водосливной плотины криволинейного очертания.

$$S = -\frac{1}{H_{\text{пр}}} 0,3095 \frac{a^3}{3} - 0,0106 \frac{a^2}{2} + a(T - 0,974H_{\text{пр}}).$$

Таким образом, подставив в полученную формулу значения профилирующего напора и удельной энергии верхнего бьефа относительно кромки уступа можно найти значения площади поперечного сечения поверхностного водослива криволинейного очертания.

При выполнении статических расчетов необходимо знать координаты точки центра тяжести криволинейного водослива ( $x_c$ ;  $y_c$ ). Если быть более точным, практический интерес представляет только одна координата центра тяжести водослива  $x_c$ . Определить эту координату можно по формуле

$$x_c = S_y / S,$$

где  $S_y$  – статический момент площади поперечного сечения поверхностного криволинейного водослива;

$S$  – площадь поперечного сечения поверхностного криволинейного водослива, которая была определена выше.

Статический момент  $S_y$  площади поперечного сечения поверхностного криволинейного водослива областью  $D$ , относительно осей  $Ox$  и  $Oy$  определяется следующим образом:

$$S_y = \iint_D x\gamma(x; y) dx dy,$$

где  $\gamma(x; y)$  – плотность поверхности ограниченной областью  $D$ .

$$S = \iint_D x dx dy = \int_0^{H_{\text{пр}}(-0,017+1,61\sqrt{D})} \int_{(1/H_{\text{пр}})0,3095x^2+0,0106x-H_{\text{пр}}0,0256}^{T-H_{\text{пр}}} x dx$$

$$\text{или } S_y = \int_0^6 (T - H_{\text{пр}} - ((1/H_{\text{пр}})0,3095x^2 + 0,0106x - H_{\text{пр}}0,0256)) x dx,$$

$$S_y = -\frac{1}{H_{\text{пр}}} 0,3095 \frac{6^4}{4} - 0,0106 \frac{6^3}{3} + \frac{6^2}{2} (T - 0,974H_{\text{пр}}).$$

Таким образом, найдя статический момент  $S_y$  и разделив его на площадь поперечного сечения плотины  $S$  можно найти координату центра тяжести водослива  $x_c$ .

Как известно касательная к любому графику дифференцируемой в точке  $x_0$  функции  $f(x)$  — это прямая, проходящая через точку  $(x_0; f(x_0))$  и имеющая угловой коэффициент  $f'(x_0) = \text{tg}\alpha$ . Следовательно, чтобы найти угол наклона уступа сливной грани криволинейного водослива нужно продифференцировать функцию, описывающую поверхность водослива.

$$f(x_0) = (1/H_{\text{пр}}) \cdot 0,3095x^2 + 0,0106x - H_{\text{пр}}0,0256,$$

$$f(x_0) = \text{tg}\alpha,$$

$$f'(x_0) = 2/H \cdot 0,3095x + 0,0106 = \text{tg}\alpha,$$

преобразив это выражение, окончательно получаем

$$f'(x_0) = 0,619x/H + 0,0106 = \text{tg}\alpha.$$

Подставив в это выражение значение ранее найденное значение  $x$  получим формулу для определения тангенса угла наклона уступа криволинейного водослива

$$\operatorname{tg}\alpha = \sqrt{1,24 \frac{P}{H_{np}} - 0,32} - 0,106.$$

Воспользовавшись тригонометрическими таблицами или вычислительными средствами можно определить угол наклона кромки уступа к горизонту.

## ВЫВОДЫ

1. В настоящее время методик расчета геометрических характеристик (площади и координат центра тяжести поперечного сечения поверхностных водосливов криволинейного очертания двухъярусных плотин, а так же угла наклона сливной кромки уступа криволинейного водослива к горизонту) нет ни в нормативной, ни в справочной литературе.

2. В статье приведена методика расчета геометрических характеристик поперечного сечения двухъярусной водосливной плотины. Данная методика позволяет широко применять вычислительные средства для расчета параметров плотины, что особенно актуально при технико-экономическом сопоставлении большого числа вариантов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Слисский, С.М. Расчет форм сопряжения бьефов двухъярусных плотин при донном режиме. Плотины, Сборник трудов № 46, МИСИ им. Куйбышева, М. – 1964.

2. Сухая, Т.А., Бубнов, В.Ф. Задачи по высшей математике. В двух частях. Минск, 1993. – 301 с.

Е.Г. Сапожников, Анорну Квами Джофрей (БНТУ)

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО  
МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ ДРЕНАЖНОЙ СКВАЖИНЫ  
ДЛЯ ПЕРЕХВАТА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ СТОКОВ,  
ПРОФИЛЬТРОВАВШИХСЯ ИЗ ХРАНИЛИЩА  
(ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ)**

В комплекс действующих и строящихся промышленных предприятий почти всегда входят искусственные водоемы, из которых происходит фильтрация в подземные воды. К таким водоемам относятся хранилища промышленных стоков, накопители, пруды и бассейны, и т. д. Размеры этих сооружений нередко бывают весьма значительными (до нескольких десятков и даже сотен гектаров) и в них постоянно или периодически поступает большое количество использованных в технологическом процессе так называемых "отработанных" или "сточных" вод. Эти воды, как правило, являются непригодными для хозяйственно-питьевых нужд из-за повышенной общей минерализации или содержания в них вредных химических веществ.

Таким образом, указанные промышленные водоемы представляют собой потенциальные очаги загрязнения подземных вод.

Задача прогноза возможной фильтрации и динамики распространения сточных вод в водоносных пластах и разработка мероприятий по защите подземных вод от загрязнения представляется в настоящее время одной из важнейших в гидрогеологии, поскольку количество промышленных бассейнов и хранилищ постоянно возрастает, а подземные воды получают все более широкое использование как источник хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Решение поставленной задачи при условии, что эффективная мощность пласта постоянна, сводится к интегрированию дифференциального уравнения (рисунок 1) [1, 2, 5]

$$\frac{T\partial}{r\partial r} \left( r \frac{\partial S}{\partial r} \right) = q \quad (1)$$

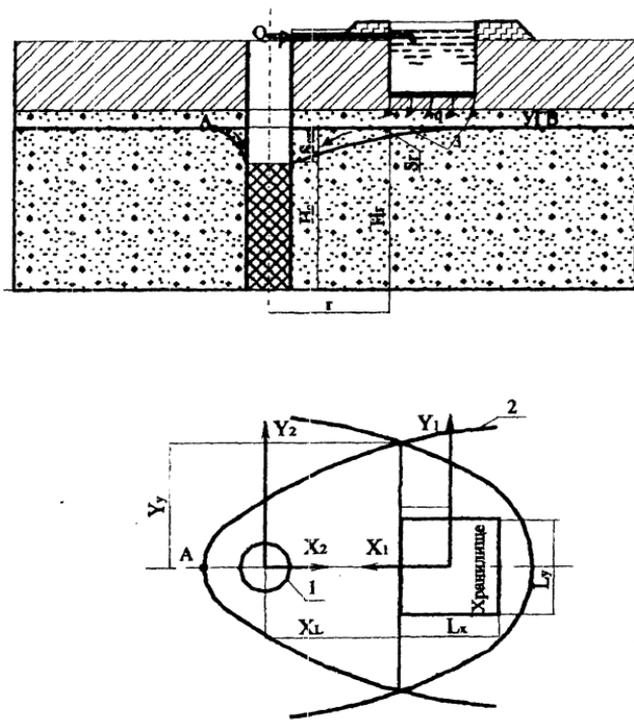


Рисунок 1 – Схема для оценки области захвата дренажной скважиной  
 1 - дренажная скважина; 2 - разделяющая (нейтральная) линия тока;  
 3 - депрессионная воронка в потоке; А - водораздельная точка;  
 $Q_{скв}$  - дебит скважины;  $q$  - интенсивность фильтрации из хранилища;  
 $S_c, S_r$  - понижение напоров в скважине и на расстоянии  $r$  м от нее

при следующих условиях,

$$\begin{cases} S|_{r=L} = 0 \\ 2\pi r T \frac{S}{r} \Big|_{r \rightarrow 0} = -Q_{скв} \geq qL_x L_y, \end{cases} \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние от скважины до места (точки) определения понижения напора, м;  $T$  – водопроницаемость,  $T = M \cdot Kф$ , м<sup>2</sup>/сут;  $S$  – пони-

жение напора в области влияния скважины, м;  $M$  - мощность пласта, м;  $q$  - интенсивность фильтрации через экран,  $\text{м}^3/\text{сут}/\text{м}^2$ ;

$Q_{\text{скв}}$  - дебит дренажной скважины,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;  $L \geq \frac{L_x}{L_y}$  - эффективные

поперечные размеры хранилища.

После интегрирования уравнения (1) и постановки условия (2), получим понижение напоров в любой точке зон влияния скважины

$$S_r = \frac{q(r^2 - L^2)}{4T} + \left( \frac{Q_{\text{скв}}}{2\pi T} + \frac{qr_{\text{скв}}^2}{2T} \right) \cdot \ln \frac{L}{r}. \quad (3)$$

Так как  $r_{\text{скв}} \ll L$ , то значение  $S_r$  можно представить в следующем виде:

$$S_r = \frac{Q_{\text{скв}}}{2\pi T} \ln \frac{L}{r} - \frac{qL^2}{4T}. \quad (4)$$

Понижение напора на фильтре скважины находим по формуле

$$S_{\text{скв}}|_{r=r_{\text{скв}}} = \frac{Q_{\text{скв}}}{2\pi T} \left( \ln \frac{L}{r_{\text{скв}}} + \zeta \right) - \frac{qL^2}{4T}, \quad (5)$$

где  $r_{\text{скв}}$  - радиус скважины, м;  $\zeta$  - дополнительное сопротивление, учитывающее фильтрационное несовершенство скважины.

Область захвата дренажной скважины определяется такой областью общего фильтрационного потока, в которой линии тока направлены непосредственно к эксплуатационной скважине. В гидродинамическом отношении она четко ограничивается так называемой нейтральной линией. Фильтрационный поток между нейтральной линией и скважиной будет непосредственно направлен к дренажной скважине, а за пределами нейтральной линии поток как бы проскакивает, минуя скважину.

Аналитическое построение линий тока может производиться с использованием известных уравнений Коши-Римана [2, 4],

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y}, \quad \frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x}, \quad \bar{\psi} = \psi/T, \quad (6)$$

где  $\bar{\psi}$  - приведенная функция тока, которая на каждой линии тока имеет постоянное значение.

Интегрируя первое из уравнений Коши-Римана (6), получим выражение для приведенной функции тока,

$$\bar{\psi} = \int \frac{dH}{dx} dy + C = Iy + \frac{Q_{скв}}{2\pi T} \operatorname{arctg} \frac{y}{x} + C. \quad (7)$$

Считая режим квазистационарным, получаем:

$$\frac{dH}{dy} = I + \frac{Q_{скв}}{2\pi T} \left( \frac{x}{x^2 + y^2} \right). \quad (8)$$

Задавая нулевое значение  $\bar{\psi}$  на линии тока, совпадающей с положительной осью  $X$ , где  $y = 0$  и  $\operatorname{arctg}(y/x) = 0$ , получим произвольную постоянную  $C = 0$ .

Поскольку между нейтральной линией и положительной осью  $X$  (линией  $\bar{\psi} = 0$ ), вследствие симметрии потока проходит расход  $0,5Q_{скв}$  то на нейтральной линии  $\bar{\psi} = Q/2T$ .

Подставляя значение  $\bar{\psi}$  в (7), получим уравнение нейтральной линии тока:

$$\frac{Q_{скв}}{2T} = Iy + \frac{Q_{скв}}{2\pi T} \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, \quad (9)$$

где  $T$  – водопроницаемость пласта основания хранилища,  $\text{м}^2/\text{сут}$ ;  $I$  – естественный уклон потока;  $x, y$  – координаты по оси  $X$  и  $Y$  соответственно.

Обозначим расстояние от скважины до хранилища как  $X_L$ , и соответствующие координаты по оси  $Y$  как  $Y_L$ , где  $2Y_L$  – ширина фронта загрязнения на расстоянии  $X_L$  от скважины (рисунок 1).

Ширина фронта загрязненной жидкости на расстоянии  $X_L$  от дренажной скважины определяется параметрами и условиями расщепления инфильтрационных вод из хранилища, т. е. при инфильтрационном расходе  $Q_6$  определяется половина ширины фронта загрязнения  $Y_L$  по уравнению раздельной линии, формировавшейся хранилищем.

Наконец, для того чтобы раздельная линия тока дренажной скважины дебитом  $Q_{\text{скв}}$  проходила через точку с координатами  $(X_L, Y_L)$ , она должна быть расположена на расстоянии  $X_L$  от хранилища, которое определяется по зависимости (10), полученной в результате решения (9) относительно  $X_L$ , т. е.

$$x = \frac{L_{\max}}{\operatorname{tg} \pi \left( 1 - \frac{2TIL_{\max}}{Q_{\text{скв}}} \right)}, \quad (10)$$

при этом  $2TIL_{\max} < Q_{\text{скв}} \leq 4TIL_{\max}$

$$L_{\max} \geq \max \left| \frac{2Y_L}{L_y} \right|. \quad (11)$$

Используя полученные выше зависимости, можно получить оптимальные расстояния от хранилища до дренажной скважины, например по минимуму приведенных затрат [3].

$$\Pi = \Pi_0 + \Pi_s S_{\text{ср}} + \Pi_c + \Pi_B L_B + \mathcal{E}_0. \quad (12)$$

При этом основным требованием является недопущение загрязнения подземных вод профильтровавшимися стоками. Для конкретного объекта (хранилища промышленные стоков) определяются

оптимальные расход дренажной скважины и ее расстояние до хранилища (рисунок 1).

Пример расчета. Инфильтрационные утечки из хранилища промышленных отходов размером  $50 \times 50 \text{ м}^2$  (рисунок 1) составляют  $150 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Требуется спроектировать дренажную скважину диаметром 150 мм, чтобы предотвратить загрязнение подземных вод в результате утечек стоков. Водоносный пласт характеризуется следующими показателями: коэффициент фильтрации грунта основания  $K = 12 \text{ м/сут}$ ; мощность пласта  $M = 25 \text{ м}$ , уклон естественного потока  $I = 0,001$ . В основании водоносного горизонта залегают глины, служащие водоупором. Сверху пласт перекрыт песчано-суглинистым слоем 4,5 м. Статический уровень располагается на отметке  $H_c = 5,5 \text{ м}$  от поверхности земли. Разность отметок воды в хранилище и статического уровня подземных вод в дренажной скважине составляет 6,5 м.

Стоимость сооружения и оборудования одной скважины  $K = 20 \text{ млн. руб}$ ; стоимость электроэнергии  $\sigma \cong 0,871 \text{ тыс. руб/кВтч}$ ; КПД водоподъемного оборудования  $\eta \cong 0,6$ .

Оптимальное решение этой задачи сводится определению минимума приведенных затрат  $\Pi_{\min}$  при расположении дренажной скважины на различных расстояниях от хранилища с обязательным условием полного забора всех профильтровавшихся стоков.

Расчеты ведем в следующей последовательности:

Шаг 1 - определяем методом подбора по зависимости (10) ширину шлейфа  $L_{\text{загряз.}}$  (на расстоянии  $L_x/2$  от центра хранилища), формирующегося в результате утечек промышленных стоков (рисунок 2):

$$\frac{150}{2 \cdot 2 \cdot 25} = 0,001 y_L + \frac{150}{2 \cdot 3,14 \cdot 225} \arctg \frac{y_L}{25}.$$

Отсюда  $y_L \cong 181,5 \text{ м}$  и следовательно  $L_{\text{загряз.}} = 2 y_L \cong 363,0 \text{ м}$ .

В соответствии с зависимостью (11)  $L_{\max}$  принимаем равным 363,0 м, так как  $2y_L = 363,0 \text{ м} > L_x = 50,0 \text{ м}$ .

Шаг 2 - определяем максимальный и минимальный дебиты скважины, причем  $X_L \rightarrow$  при  $Q_{\text{скв}} \rightarrow Q_{\min} = 2TIL_{\max} = 2 \cdot 12 \cdot 25 \cdot 0,001 \cdot 363 = 217, \text{ м}^3/\text{сут}$ , а  $X_L \rightarrow \infty$  при  $Q_{\text{скв}} \rightarrow Q_{\min} = 2TIL_{\max} = 4 \cdot 12 \cdot 25 \cdot 0,001 \cdot 363 = 435,6 \text{ м}^3/\text{сут}$ . По заданным расходам определяем понижение  $S_{\text{скв}}$  воды ■

скважине по формуле (5), а ее месторасположение  $X_L$  по отношению к хранилищу по формуле (10). Результаты расчета величин  $S_{скв}$  и  $X_L$  приведены в таблице 1.

Шаг 3 – по формуле (12) рассчитываются приведенные затраты, связанные с сооружением и эксплуатацией рассматриваемого варианта дренажной скважины (таблица 1).

Шаг 4 – строится график приведенных затрат в зависимости от удаления дренажной скважины до хранилища промышленных стоков (рисунок 2). По графику определяется оптимальное расстояние  $x_{L_{opt}}$  между скважиной и хранилищем. В нашем примере  $x_{L_{opt}} = 115 \text{ м}$ .

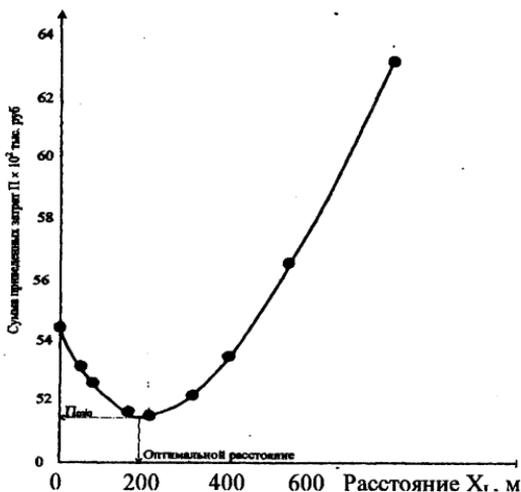


Рисунок 2 – График для выбора оптимального расстояния дренажной скважины относительно хранилища промышленных стоков

Таблица 1 – Определение оптимального месторасположения скважины для перехвата загрязняющих стоков профильтровавшихся из хранилища стоков (технико-экономический расчет)

Дебит скважины, $Q_{\text{скв}}$ , $\text{м}^3/\text{сут}$	Расстояние от хранилища до скважины, $X_L$ , мм	Понижение воды в скважине, $S_{\text{скв}}$ , $\text{м}^2$	Приведенные затраты				Сумма приведенных затрат, $\Pi$ тыс. руб.
			для подъема воды на геометрическую высоту $\Pi_0$ тыс. руб	для подъема воды на понижение уровня воды в скважине, $\Pi_{\text{в}} S_{\text{скв}}$ тыс. руб.	на сооружение и эксплуатацию водовода, $\Pi_{\text{в}} L_{\text{в}}$ тыс. руб.	на транспортировку воды в водоподъемных трубах, $\Xi_0 L_{\text{п}}$ тыс. руб.	
435,6	0	2,01	4110,25	1271,02	36,49	4,86	5417,71
415,6	27,49	1,91	3921,53	1152,33	234,36	4,17	5308,22
395,6	58,14	1,81	3732,82	1039,45	450,52	3,55	5222,79
375,6	93,05	1,70	3544,10	926,92	692,75	3,00	5163,77
355,6	133,90	1,61	3355,38	831,10	972,63	2,51	5159,11
335,6	183,50	1,51	3166,67	735,64	1309,36	2,08	5211,79
315,6	246,88	1,42	2977,95	650,57	1737,05	1,71	5365,57
295,6	334,09	1,32	2789,23	566,43	2323,59	1,38	5679,35
275,6	468,81	1,22	2600,52	488,10	3228,57	1,10	6317,19

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов, С.К., Алексеев, И.С. Забор воды из подземного источника. – М.: Колос, 1980. – 340 с.
2. Полубаринова-Кочина, П.Я. Теория движения грунтовых вод. – Изд. 2-е, главная редакция физико-математической литературы. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
3. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84) / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. – 272 с.
4. Шестаков, В.М. Динамика подземных вод. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 367 с.
5. Ground water pollution and conservation “Environmental. Sc. and Technology.” 1972, 6, № 2, 213 – 225.

*УДК 627.8.065*

М.Е. Минчукова, Г.Г. Круглов (БНТУ)

### **ПОЛИМЕРНЫЕ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Обеспечение экологической безопасности гидротехнических сооружений различных систем является основным условием при их эксплуатации.

В комплекс гидротехнических, водоохраных и очистных объектов, как правило, входят защитные дамбы, отстойники и накопители, промышленные бассейны, которые должны быть оборудованы противодиффузионными экранами, препятствующими проникновению воды и вредных веществ в нижележащие горизонты.

Устройство экранов из геосинтетических материалов нового поколения является наиболее современным техническим решением гидроизоляции сооружений. Практическая водонепроницаемость и высокая стойкость пленок полимерных материалов к воздействию агрессивных жидкостей позволяют обеспечить высокую надежность сооружений [1].

Существуют следующие типы геосинтетических элементов, выполняющих в противодиффузионной конструкции определенное функциональное назначение:

1. Мембраны – пленочные и листовые изолирующие покрытия, обеспечивающие водонепроницаемость конструкции;

2. Геотекстильные полотна – тканые и нетканые водопроницаемые материалы, защищающие гидроизоляционный ковер от механических повреждений, а также обеспечивающие его контакт с конструктивными элементами сооружения;

3. Геокомпозиты – пространственные полимерные покрытия, представляющие собой композит на основе двух предыдущих групп геосинтетиков, обладающий улучшенными физико-механическими характеристиками и новыми функциональными возможностями по сравнению с составляющими его материалами.

Мембраны представляют собой изгибаемые пленочные материалы, изготавливаемые из синтетических полимеров или продуктов на основе битумов [2]. Для изготовления мембран наиболее часто в качестве базовых химических продуктов используют: кристаллические термопластики (полиэтилен низкой и высокой плотности ПНП и ПВП, полипропилен); термопластики (поливинилхлорид ПВХ); эластомеры (каучук, изопрен-изобутилен БК) и др.

Для улучшения свойств указанных полимеров, повышения химической стойкости, тепло- и атмосферостойкости, деформационной способности, долговечности при изготовлении в их состав вводят: наполнители (кварцевая мука, мел, асбестовое волокно, армирующий геотекстиль, сетки и др.), пластификаторы (сложные эфиры, цинковая кислота и др.), свето- и термостабилизаторы (газовая сажа, стеарат свинца, трехосновной сульфат свинца и др.), красители (нигрозин, пигмент желтый, охра, сурик и др.) (рисунки 1).

Геотекстили также представляют собой широкий ассортимент материалов, предназначенных для разнообразного использования в строительстве. Они имеют вид полотна из синтетических и полимерных волокон (полиамида, полиэтилена, полипропилена, полиэфира, нитрона и др.) [3]. Важнейшие свойства геотекстильных материалов: сплошность – объединение волокон в единое полотно, обладающее прочностью при растяжении, тонкость, гибкость – малое сопротивление изгибу полотна.

По типу материала геотекстили подразделяются на тканые и нетканые (рисунок 2 – по классификации T.Chrgan). Тканые материалы имеют упорядоченную структуру в виде двух взаимно перпендикулярных систем нитей, переплетенных между собой. Нетканые материалы имеют беспорядочную спутанно-волоконистую структуру и менее прочны по сравнению с тканями.

Производство нетканых материалов состоит из двух основных операций: формирование холста из волокон и его упрочнение.

В дальнейшем холст нетканых или тканых материалов упрочняется механическим, химическим, термическим или комбинированным способами. Наиболее распространенным из них является механический-иглопробивной, заключающийся в переплетении волокон иглами с зубринами, расположенными на движущейся пластине. Иглы пробивают прочес с определенной частотой, что придает ему заданную прочность.

Способ горячего склеивания прочеса заключается в пропуске его между двумя нагретыми цилиндрами при большом давлении с предварительным введением в смесь некоторого количества легкоплавких волокон. Способ химического склеивания полотна основывается на концентрации различных связующих в пересечениях волокон, что позволяет фиксировать холст так же, как и при термическом упрочнении. Для химически упрочненных полотен существует опасность изменения свойств во времени вследствие разложения вяжущего. Кроме того, обработка дорогостоящим связующим существенно повышает стоимость нетканого материала.

Существующие в настоящее время виды производимых в СНГ и за рубежом полимеров достаточно разнообразны (таблица 1) [4-9]. Поэтому при выборе того или иного материала с целью применения в конкретных противофильтрационных конструкциях следует исходить из ряда условий:

- 1) прочность, долговечность, морозостойкость и водонепроницаемость;
- 2) возможность легкого и быстрого соединения в большие полотна;
- 3) доступность и относительно низкая стоимость;
- 4) перспективность производства и применения.

В наибольшей степени этим условиям удовлетворяют материалы из полиэтилена и поливинилхлорида. Об этом свидетельствует оте-

чественный и зарубежный опыт возведения полимерных экранов гидросооружений.

Сравнительный анализ важных для применения в водохозяйственном строительстве свойств различных полимерных материалов представлен в таблице 2.

Все рассмотренные материалы абсолютно водонепроницаемы и являются надежным средством противofильтрационной защиты гидротехнических сооружений и других строительных объектов.

При строительстве сооружений, где, наряду с противofильтрационными требованиями, необходимо решать проблемы укрепления оснований и откосов, повышения несущей способности грунтов, целесообразно применение геосинтетиков VLDPE, HDPE, FATRAFOL-790, Friction-мембрана, Тefonд-композит.

В условиях воздействия химически агрессивной среды (накопители сточных вод, бытовых и промышленных отходов, хранилища опасных химических продуктов) предпочтительно использование материалов HDPE, Техполимер и FATRAFOL-803, обладающих превосходной химической стойкостью.

Все материалы на основе ПВХ и ПЭ отвечают техническим требованиям способности к свариванию или склеиванию. Кроме того, пленки ПВХ допускают оба способа соединения. Материалы системы Тefonд отличаются способом крепления полос с помощью механического замка: наложением одного полотна на другое с внутренним герметиком, что позволяет обеспечить простоту и легкость укладки материала.

Стоимость материала – весьма важный показатель при выборе его в качестве гидроизоляционного элемента. Тем не менее, определяющими должны быть качественные характеристики материала, обеспечивающие гарантию экологической безопасности сооружения.

Полимерные пленочные конструкции, благодаря присущим им качественно новым характеристикам, обеспечивают создание надежных и долговечных конструкций, отвечающих современным требованиям защиты окружающей среды.

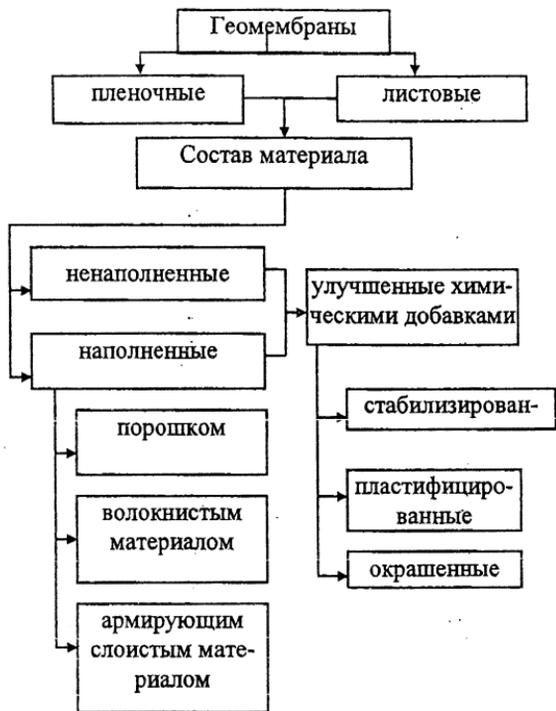


Рисунок 1 – Классификация геомембран

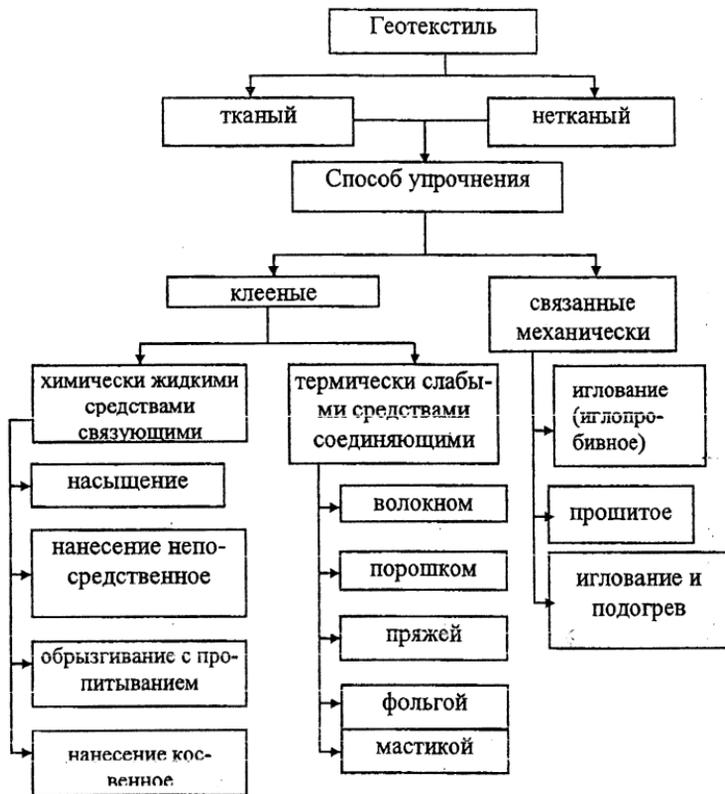


Рисунок 2 – Классификация геотекстиля

Таблица 1 – Краткая характеристика полимерных материалов

Вид материала	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Диапазон эксплуатационных температур, °С	Параметры		Состав	Стоимость 1 м <sup>2</sup> (с учетом материала и укладки)
				толщина, мм	ширина, м		
1	2	3	4	5	6	7	8
Полиэтиленовая пленка марки "В"	13,9	262	-70...+110	0,2	12,0	ПНП	500 бел.руб. (стоимость материала)
VLDPE-мембрана	до 26,2	до 850	-120..+126	1,0..2,0		ПНП	13-18 \$
HDPE-мембрана						ПВП	
Friction-мембрана						Текстурированный материал на основе ПНП или ПВП	

1	2	3	4	5	6	7	8
Техполи- мер- мембрана	18,6	465	-70...+60	до 1,0 мм	1,6	ПВП+стабил изирующие добавки	80 рос. руб.
Гидропласт рельефный			-40...+70	7,0...26,0	1,2...1,5	листы ПВХ	
Телефонд рельефный	Макс. уси- лие разры- ва Н/5см >300	25,0	-30...+60		1,5	ПВП	
Фатрафол- 803	15,0..19,1	до 366,0	-20...+70	0,6...2,0	1,2...1,3	пластифици- рованный ПВХ	8-15 \$
ЕКОPLAST	20,7	386,0	-20...+70	1,0...1,5	1,3		
AQUA- PLAST		оличн. рас- тяж.	-20...+70	0,6...1,0	1,3		
Полипропил еновая пленка	25,0-40,0	200- 800	-15...+160			полипропи- лен	

1	2	3	4	5	6	7	8
Бутилкаучуковая пленка, армиров.	до 14,0	350-1500	-60...+105	0,8...2,0	6,0	полиизобутиленовый каучук	
FATRAFOL-790-композит	высокая прочность		-20...+70	1,5...1,7	1,3	пластифицированный ПВХ + армирующая полиэфирная решетка	12-15 \$
SWELL-TITE- двух-слойная мембрана	Потенциал разбухания натриевого бентонита		-15...+40	1,5...2,3	1,02	ПНП+слой натриевого бентонита с каучуком	
ТЕФОНД - композит марки: Дрейн Дрейн Плюс Эйч-Пи	Н/5 см: >300 >350 >650	25,0	-30...+60		2,07	ПВП+ нетканый полиэстер (полипропилен). Рельеф - в виде сферических выпуклостей	

Таблица 2 – Сопоставление свойств полимерных материалов

	ПЭ- пленка 0,2 мм	VLDPE	HDPE	Техпо- лимер	Тефонд	Гидро- пласт	Fatra- fol 803	Fatra- fol 790	ЕКО- PLAST	AQUA- PLAST	SWEL LTITE	Те- фонд- компо- зит
Прочность	+	++	++	+	+	отс	+	++	+	+	+	+++
Деформац. способ- ность	+	++	+	+	+—	+—	+	+	+	++	отс	+—
Твердость	+—	+—	+—	+—	+—	+—	+—	+—	+—	+—	+—	+—
Водоне- проницае- мость	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Химич. стойкость	+	+	++	++	+	+	++	+	+	+	+	+
Морозо- стойкость	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Долговеч- ность	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Способ- ность к свар. склеив	+—	++	++	++	мех. замок +гер- метик	отс	+++	+++	+++	+++	бетон ная стяж- ка	мех. замок +герме- тик

+ - хорошие свойства

++ - улучшенные свойства по сравнению с другими материалами

+— - не в полной мере отвечающие требованиям

отс - сведения отсутствуют

## ЛИТЕРАТУРА

1. Радченко, В.Г., Семенков, В.М. Применение геосинтетических материалов при строительстве плотин // Гидротехническое строительство. – 1994. – № 5.
2. Пленочные противofильтрационные устройства гидротехнических сооружений. Под ред. И.Е.Кричевского. – М.: Энергия, 1976. – 208 с.
3. Бондарева, Э.Д., Валерьянов, В.И., Диндаров, В.Э. Технико-экономические аспекты применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве // Строительные материалы. – 1997. – № 9. – С. 16-19.
4. Мембранные технологии // Проспект АОЗТ "Растро". – 2002. – 5 с.
5. Геомембрана // Проспект фирмы "Техполимер". – 2002. – 3 с.
6. Строительные материалы, оборудование // Проспект ОАО Нелидовский завод пластмасс. – 2002. – 2 с.
7. Строительные материалы, оборудование // Проспект ООО Тегола-Самара. – 2002. – 3 с.
8. Гидроизоляция и противорадоновая защита пленками PVC и PE-HD // Инструкция ЗАО "Стройтехпласт". – 2001. – 38 с.
9. Строительные материалы, оборудование // Проспект ООО ПСМ-Альфа. – 2002. – 2 с.

*УДК 556.12(476.1/9)*

В.Е. Валуев, А.А. Волчек, О.П. Мешик, В.Ю. Цилиндь

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОСТИ КОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Распределение атмосферных осадков по территории Беларуси представляет собой сложную картину "пятнистости", обусловленную определенным сочетанием физико-географических факторов исследуемого региона. Глобальные и местные факторы находятся в достаточно сложном взаимодействии и влияют на атмосферные осадки всей своей совокупностью. Выполненный нами поиск опти-

мальной длины ряда наблюдений методом последовательного анализа [6] дал 70-летние и более периоды с устойчивой средней величиной атмосферных осадков на территории Беларуси. Однако, имея длительные ряды наблюдений, различные авторы до настоящего времени получают не одинаковые годовые нормы атмосферных осадков для одних и тех же метеопунктов. На эти различия указывается и в работе [4]. Отклонения величин осадков существенны и составляют от 15 до 30 % истинной годовой нормы (130...200 мм.). Такое количество атмосферных осадков для территории Беларуси соизмеримо с оросительной нормой многолетних трав в среднесушливый год (75 %-ной обеспеченности дефицитов водопотребления). К тому же, как отмечает А.Г.Булавко [1], получаемые значения норм осадков, с учетом официально действующих поправок превышают на 5...8 %. Пространственная изменчивость атмосферных осадков нами оценивается по следующей схеме

$$C_{vi} = \left( \sum_j (M_{ij} / \bar{M}_i - 1)^2 \cdot (K - 1) \right)^{0,5}, (j = \overline{1, K}), \quad (1)$$

где  $M_{ij} = f(X_j; Y_j; H_j; t_j)$  - значения атмосферных осадков в любом (j)-пункте Беларуси в функции от его географических координат ( $X_j; Y_j$ ), высоты местности над уровнем моря ( $H_j$ ) и времени ( $t_j$ );  $\bar{M}_i$  - среднее значение атмосферных осадков (норма) для (i) - го интервала времени. Полученные величины ( $C_{vi}$ ) для территории Беларуси представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты пространственной вариации ( $C_{vi}$ ) атмосферных осадков для территории Беларуси (в целом)

Месяцы	1	2	3	4	5	6	
$C_{vi}$	0,11	0,10	0,09	0,08	0,06	0,05	
Месяцы	7	8	9	10	11	12	Год
$C_{vi}$	0,07	0,07	0,08	0,07	0,10	0,10	0,05

Оценка пространственно-временных колебаний величин атмосферных осадков на территории Беларуси нами осуществлена при комплексном исследовании экспериментальных материалов 124

метеопунктов и за репрезентативный пятнадцатилетний период (1951-1965 гг.). В результате перераспределения тепла и влаги по земной поверхности, образуются районы, имеющие какой-либо общий признак. Одним из таких признаков является синхронность колебаний метеорологических элементов. В качестве основного способа оценки синхронности колебаний величин атмосферных осадков на территории Беларуси мы отдали предпочтение вычислению парной корреляции рядов наблюдений за осадками, исходя из того, что коэффициент корреляции является не только объективной качественной, но и количественной характеристикой этих колебаний. При этом выделяются группировки рядов, скоррелированные не менее заданного уровня (например,  $r_{кр}=0,8$ ). Опыт районирования территории Беларуси по осадкам с использованием данного приема отсутствует, поэтому, ограничимся изложением результатов собственных исследований синхронности их месячных величин в годовом разрезе. Наиболее приемлемый уровень скоррелированности атмосферных осадков ( $r_{кр}$ ) представлен помесечно в таблице 2.

Таблица 2 – Исходный уровень скоррелированности атмосферных осадков, принятый для территории Беларуси

Мес.	1	2	3	4	5	6	
гкр	0,85	0,75	0,88	0,78	0,78	0,75	
Мес.	7	8	9	10	11	12	Год
гкр	0,76	0,76	0,82	0,85	0,84	0,85	0,80

В районах синхронного выпадения атмосферных осадков установлена их пространственно-временная изменчивость ( $C_v$ ). Каждому месяцу присущ только свой набор пунктов, объединенных в характерном районе. Количество районов синхронного выпадения осадков для каждого месяца представлено в таблице 3.

Необходимо отметить, что границы выделенных нами районов (рисунок 1) часто совпадают с границами почвенных районов, водосборов и приурочены к естественным повышениям рельефа. "Пятнистость" выпадения атмосферных осадков, выявленная в репрезентативный период (1951...1965 гг.), можно априори распространить на сколь угодно длительную ретроспективу, чтобы данный фактор, наряду с другими, использовать как определяющий при ис-

следовании генезиса почв и пестроты почвенного покрова в целом на территории Беларуси. Обнаруживается тесная связь очертаний границ районов синхронного выпадения дождей в июне (рисунок 1) и почвенного покрова юго-западной части территории Беларуси [5]. На данной территории распространены полугидроморфные почвы (подзолисто-болотные, дерново-болотные, дерново-карбонатно-солончаковые, аллювиальные дерново-болотные). Среднеголетняя норма осадков (июнь), активно участвующих в почвообразовательном процессе, колеблется по территории от 55 до 71 мм. Атмосферные осадки являются определяющим фактором общего круговорота воды, растворения, переноса химических элементов на большие расстояния и распределения их по исследуемой территории в соответствии с выявленной картиной "пятнистости". Кроме того, обнаруживается аналогичное (зональное) распределение по территории Беларуси комплекса радиоактивных частиц, выпавших после Чернобыльской катастрофы. Для мая количество районов синхронного выпадения атмосферных осадков достаточно велико (таблица 3), особенно на юго-востоке Могилевской, Гомельской и Брестской областей, а также на северо-востоке Гродненской и юго-западе Минской области. Именно здесь имеет место наибольшая пестрота плотности радиоактивного загрязнения.

Таблица 3 –Количество районов синхронного колебания атмосферных осадков на территории Беларуси

Месяцы	1	2	3	4	5	6	
Районы, шт.	31	31	19	27	39	34	
Месяцы	7	8	9	10	11	12	Год
Районы, шт.	42	46	40	25	31	29	37

Плотность и репрезентативность осадкомерной сети такова, что обеспечивает данными наблюдений все исследуемые (локальные) участки, в частности сельскохозяйственные поля, в границах которых необходимо иметь количественные показатели влагообмена на уровне подстилающей земной поверхности. Поэтому в основе прикладной количественной оценки атмосферных осадков

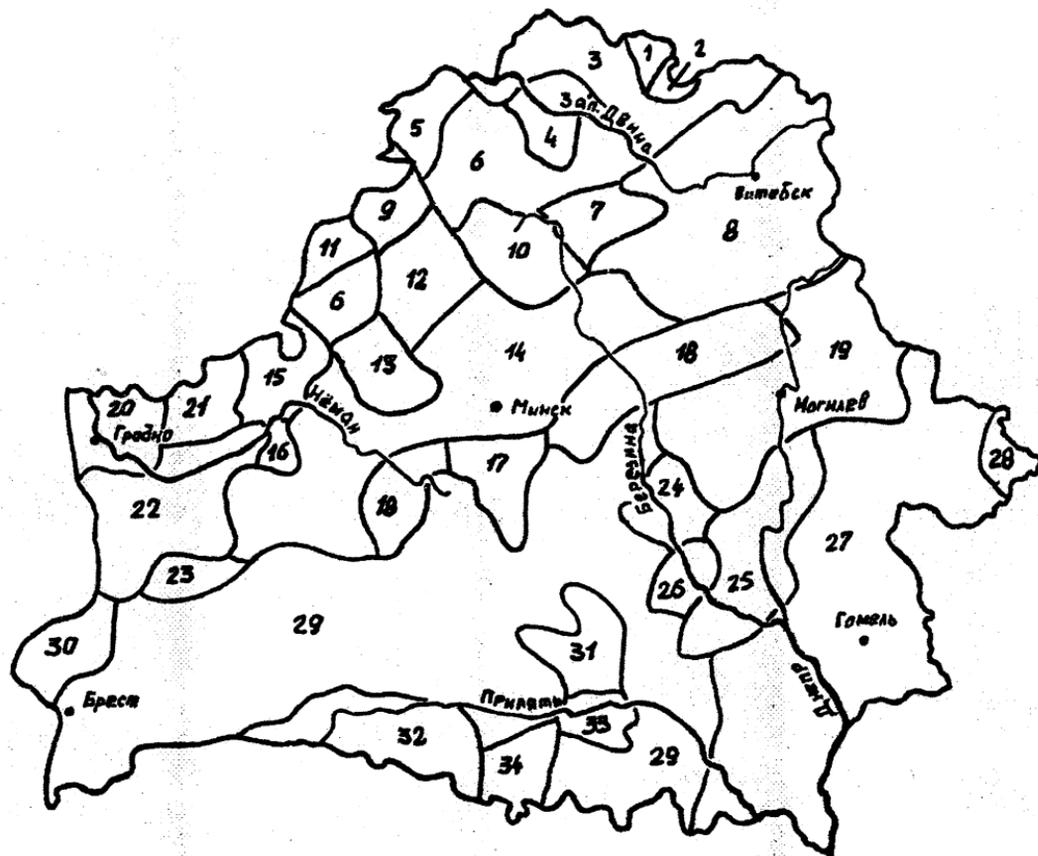


Рисунок 1 – Схема районирования территории Беларуси по синхронности выпадения атмосферных осадков в июне (районы 1...34) при  $r_{\text{иср}}=0.75$

нами положена возможность определения их величин в любой конкретной точке сельскохозяйственного поля. Это может быть реализовано с помощью трехмерной нелинейной модели, аппроксимируемой полиномом степени  $(n)=2$ , когда в качестве исходной функции пространственного распределения осадков принимается функция  $(X(\varphi, \lambda, H))$  [2], а само уравнение имеет вид

$$X_j = \alpha_{0j} + \alpha_{1j} \cdot \varphi + \alpha_{2j} \cdot \lambda + \alpha_{3j} \cdot H + \alpha_{4j} \cdot \varphi^2 + \alpha_{5j} \cdot \lambda^2 + \alpha_{6j} \cdot H^2 + \alpha_{7j} \cdot \varphi\lambda + \alpha_{8j} \cdot \varphi H + \alpha_{9j} \cdot \lambda H, \quad (2)$$

где  $X_j$  – норма атмосферных осадков в расчетном пункте за  $(j)$  – интервал времени, мм;  $\varphi, \lambda$  – условные прямоугольные координаты (широта, долгота) расчетного пункта, принятые, в данном исследовании, относительно пункта Минск, км;  $H$  – абсолютная отметка поверхности земли в расчетном пункте, м;  $\alpha_{0j}, \dots, \alpha_{9j}$  – коэффициенты частных уравнений регрессии (2) для оценки сумм атмосферных осадков за различные интервалы осреднения (таблица 4).

Значения коэффициентов  $(\alpha_{ij})$ , полученные по уравнению (2), подтверждают наибольший вклад в величины атмосферных осадков основного регионального фактора-высоты местности  $(H)$ .

При решении ряда прикладных задач используются среднесуточные величины осадков  $(\bar{P}_{\text{сут.}})$ . Оценка их значений, заданных на дискретном множестве точек, и экстраполяция на всю область определения функции непрерывного аргумента возможны с использованием Фурье-анализа. Аппроксимирующая функция разлагается в ряд Фурье и находится сумма этого ряда по формуле

$$f(X) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nX + b_n \cdot \sin nX), \quad (3)$$

где  $a_0, a_n, b_n$  – коэффициенты Фурье, которые находятся по формулам (4), (5), (6).

Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Коэффициенты частных уравнений регрессии вида (2) для оценки сумм атмосферных осадков на территории Беларуси

Расчетный период (j), значения коэффициентов ( $\alpha_j$ ), коэффициент множественной корреляции (R)											
j	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	R(*)
январь	0	0	0,01704	0	-0,00013	-0,00003	0,00028	0	0	0	0,75
февраль	41,94159	0	0	0	-0,00004	0	0,00028	0	0	0	0,53
март	42,67415	0	0,03975	0	-0,00010	-0,00003	0,00019	0,00013	0	-0,00016	0,71
апрель	49,83828	-0,00929	0,06762	0	-0,00013	-0,00004	0	0	0	-0,00036	0,61
май	50,34423	0	0,03343	0,07473	-0,00005	-0,00006	0	0	-0,00005	-0,00017	0,54
июнь	66,75040	-0,00363	0	0,07881	-0,00008	0,00002	0	0	0	0	0,55
июль	78,61711	-0,01374	0,03701	0,07197	-0,00005	-0,00015	0	0,00015	0	0	0,57
август	66,46948	0,02294	-0,04540	0,10630	0,00007	-0,00007	0	-0,00006	0	0,00024	0,68
сентябрь	63,27951	0	0,11728	0	-0,00005	-0,00009	0	0,00008	0,00016	-0,00066	0,80
октябрь	50,61180	0,01175	0,06301	0,02328	-0,00004	-0,00006	0	0,00007	0	-0,00029	0,73
ноябрь	65,17342	0,00853	-0,02416	-0,14789	0	-0,00009	0,00073	-0,00006	0	0,00021	0,73
декабрь	71,55665	0	0,06562	-0,16847	-0,00021	-0,00005	0,00058	0,00005	-0,00008	-0,00026	0,68
год	638,7432	0	0,47642	0,73567	-0,00092	-0,00067	0	0,00049	0	-0,00205	0,79

(\* Примечание: Критическое значение коэффициента множественной корреляции ( $R_{кр}$ )=0,31 [3].

Таблица 5 – Коэффициенты Фурье, рекомендуемые к использованию при оценке среднесуточных осадков на территории Беларуси (формулы 4, 5, 6)

Значения соответствующих коэффициентов в формулах (4), (5), (6)					
a0	a1	a2	a3	a4	a5
-1,9758	-0,4732	0,0986	-0,0023	0,0734	0,0123
b1	b2	b3	b4	b5	
0,1589	-0,3145	0,1057	0,0222	-0,0544	

$$a_0 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^m Y_k ; \quad (4)$$

$$a_n \approx \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=1}^m Y_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot k}{m}\right) \cdot n, \quad (5)$$

$$b_n \approx \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=1}^m Y_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot k}{m}\right) \cdot n, \quad (6)$$

где  $m$  - число известных пар значений  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_m, Y_m)$ .

График предлагаемой функции аппроксимации среднесуточного количества атмосферных осадков на территории Беларуси представлен на рисунке 2., где точками обозначены среднемесячные значения осадков в привязке к суточному их ходу. Моделирование суточных значений атмосферных осадков нами проводится методом статистических испытаний (Монте-Карло). Рассмотрим конкретный пример. Пусть имеются суточные значения атмосферных осадков для марта месяца, рассчитанные по формуле (3), которые приведены в таблице 6.

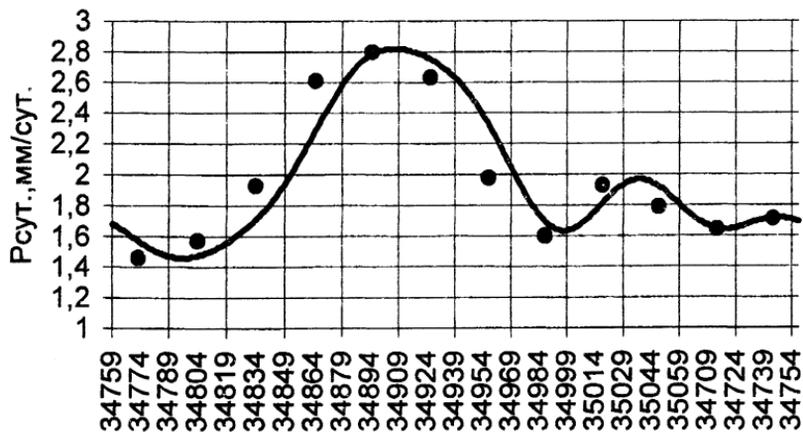


Рисунок 2 – Среднесуточное количество осадков  $\bar{P}_{сут}$  (мм/сут) на территории Беларуси

Таблица 6 – Суточные значения атмосферных осадков (март) на территории Беларуси, полученные по формуле (3)

Календарные даты / атмосферные осадки, мм/сут.										
1/1,68	2/1,67	3/1,66	4/1,65	5/1,65	6/1,64	7/1,64	8/1,63	9/1,62	10/1,61	11/1,60
12/1,59	13/1,59	14/1,58	15/1,57	16/1,56	17/1,55	18/1,55	19/1,54	20/1,53	21/1,52	22/1,52
23/1,51	24/1,50	25/1,50	26/1,49	27/1,49	28/1,48	29/1,48	30/1,47	31/1,47		

Методом статистических испытаний на ПЭВМ нами установлено также распределение на территории Беларуси периодов с осадками и без осадков (для марта приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Распределение на территории Беларуси периодов с осадками (заштриховано) и без осадков в течение марта

Календарные даты										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29	30	31		

Суммарное количество атмосферных осадков, выпавших в (j) период с дождливой погодой, при имитационном моделировании определяется как

$$P_{j-пер} = \sum_{i=1}^{m_j} P'_{cym}, \quad (7)$$

где  $m_j$  – количество суток в (j) – периоде с осадками;  $P'_{cym} = P_{cym} + \bar{\zeta}_{j(cym)}$  – исправленное на среднесуточную величину ( $\bar{\zeta}_{j(cym)}$ ) суточное количество атмосферных осадков ( $P_{cym}$ ), рассчитанных по формуле (3), – табл.6, 7. Суммарная величина поправки за рассматриваемый (j) период ( $\zeta_j$ ) определяется за время, эквивалентное по продолжительности периоду (j - 1) с ясной погодой, смежному и предшествующему рассматриваемому периоду (j). При этом, используется зависимость (3) и равенство

$$\zeta_j = \sum_{i=1}^{m_{j-1}} P''_{cym(j-1)}. \quad (8)$$

Среднесуточная величина поправки ( $\bar{\zeta}_{j(\text{сум.})}$ ), вносимой в суточные величины атмосферных осадков дождливого периода ( $j$ ), определяется как

$$\bar{\zeta}_{j(\text{сум.})} = \frac{1}{m_j} \cdot \sum_{i=1}^{m_{j-1}} P_{\text{сум.}(j-1)}^{//} \quad (9)$$

где  $\sum_{i=1}^{m_{j-1}} P_{\text{сум.}(j-1)}^{//}$  - сумма суточных величин атмосферных осадков, рассчитанных по функции (3), табл. 6,7, за время ( $m_j - 1$ ), эквивалентное по продолжительности периоду ( $j - 1$ ) с ясной погодой;  $m_j$  - продолжительность рассматриваемого ( $j$ ) - периода, в который вносится поправка;  $m_j - 1$  - то же предшествующего периода с ясной погодой ( $j - 1$ ). Смоделированное дискретно во времени суточное количество атмосферных осадков для марта месяца представлено в таблице 8.

Предлагаемая нами модель реализации процесса выпадения атмосферных осадков на территории Беларуси может экстраполироваться на любой по продолжительности период. Моделирование процесса выпадения атмосферных осадков различной обеспеченности позволяет получить любое количество его реализаций и, следовательно, любое количество реализаций процесса управления водным балансом (режимом) на исследуемом уровне. Управление водным балансом процесса тепловлагомассообмена на уровне деятельной поверхности водосборов исключает потерю информации, позволяет привлекать смоделированные ряды балансовых элементов оптимальной продолжительности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булавко, А.Г. Водный баланс речных водосборов. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 304 с.
2. Закс Лотар. Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 392 с.

Таблица 8 – Суточные значения атмосферных осадков на территории Беларуси (март), полученные имитационным моделированием (формулы 7...9)

Календарные даты / атмосферные осадки, мм/сут										
1/1,68	2/-	3/-	4/-	5/2,07	6/2,06	7/2,06	8/2,05	9/-	10/1,84	11/1,83
12/1,82	13/1,82	14/1,81	15/1,80	16/1,79	17/-	18/-	19/-	20/-	21/-	22/-
23/2,28	24/2,27	25/-	26/-	27/-	28/-	29/-	30/-	31/-		

3. Климат Беларуси / Под ред. В.Ф.Логинова.— Минск: Институт геологических наук АН Беларуси, 1996. — 235 с.
4. Почвы Белорусской ССР. — Минск, 1974.
5. Швер, Ц.А. Применение метода последовательных изменений и интегрально-разностных кривых для вычисления норм осадков. — Труды ГГО, 1964, вып. 162. — С. 22-36.

*УДК 556.166 "321" (476)*

В.Е. Валуев, А.А. Волчек, В.В. Лукша, О.П. Мешик, В.Ю. Цилинда

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

Исследование стока малых рек в общем и экстремальных его значений в частности является актуальной проблемой для территории Беларуси, где малых рек более 20 тысяч. В условиях энергетического кризиса использование энергии малых рек потребует более углубленного исследования гидрологического режима гидрографической сети и водосборов.

Прогнозная оценка экстремальных значений стока малых рек Беларуси дает возможность предотвращения негативных явлений на сельскохозяйственных землях в поймах малых рек, возникающих в периоды весеннего половодья и летне-осенней межени.

Малая река, как объект природы, согласно ГОСТ 19179-73 [1] — это река, бассейн которой располагается в одной географической зоне, и гидрологический режим ее под влиянием местных факторов может отличаться от рек данной зоны. Однако в различных областях знаний и практической деятельности эту категорию рек определяют, обычно, по длине или площади водосбора, причем, не всегда равноценным. Эти различия в понятии малой реки связаны, прежде всего, с видом исследований и разными подходами к проблеме малых рек, с точки зрения современных наук. Исследование режимов стока малых рек Беларуси позволило авторам, руководствуясь нор-

мативными документами и литературными источниками, принять для разработки методики оценки максимального стока весеннего половодья следующее определение: малая река для исследуемой территории - это река, имеющая размер водосборной площади не более 2000 км<sup>2</sup> и протяженность не более 200 км.

Задачей настоящего исследования является построение физико-математических моделей зависимостей максимального стока весеннего половодья от определяющих его факторов. Необходимость разработки моделей назрела из-за отсутствия приемлемых региональных зависимостей для определения максимальных расходов весеннего половодья и несовершенства методики, рекомендованной (СНиП 2.01.14-83 "Определение расчетных гидрологических характеристик" [2]. Полученные зависимости являются возможным вариантом расчета максимального стока весеннего половодья в дополнение к предложенным авторами в Пособии П1-98 к СНиП 2.01.14-83 [3].

Построение физико-математических моделей максимального стока весеннего половодья осуществлено с использованием основных стокоформирующих параметров по 110 бассейнам малых рек Беларуси [4, 5, 6].

Полуэмпирическая физико-математическая модель максимального стока малых рек Беларуси имеет вид

$$\bar{Q}_{\max} = \frac{\bar{q}_{\max} \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3}{(A + 1)^{0,02}} \cdot A, \quad (1)$$

где  $\bar{q}_{\max}$  – единичный мгновенный максимальный расход весеннего половодья для элементарного водосбора, м<sup>3</sup>/с; определяется по картам изолиний или по зависимости

$$\bar{q}_{\max} = \frac{H_{\text{ср.}}^{2,13} \cdot \lambda^{2,88}}{\varphi^{5,81}}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{ср.}}$  – средняя высота водосбора в Балтийской системе координат, м;  $\lambda$ ,  $\varphi$  – соответственно географическая долгота и широта центра тяжести водосбора, град.;  $\delta$  – коэффициент, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер на максимальный сток;  $\delta_1$  – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в залесенных бассейнах;  $\delta_2$  – коэффициент, учиты-

вающий снижение максимального расхода воды в заболоченных бассейнах;  $\delta_3$  – коэффициент, учитывающий влияние среднего уклона реки на максимальный сток;  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Коэффициенты уравнения (1) определяются по следующим формулам:

$$\delta = \frac{1}{(f_{\text{оз.}} + 1)^{n_1}}, \quad (3)$$

$$\delta_1 = \frac{1}{(f_{\text{с.л.}} + f_{\text{з.л.}} + 1)^{n_2}}, \quad (4)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{(f_{\text{б.}} + 1)^{n_3}}, \quad (5)$$

$$\delta_3 = (1 + I_{\text{ср.р.}})^{n_4}, \quad (6)$$

в которых  $f_{\text{оз.}}$  – озерность водосбора, %;  $f_{\text{с.л.}}$  – площадь водосбора, занятая сухим лесом, %;  $f_{\text{з.л.}}$  – площадь водосбора, занятая лесом на заболоченных землях, %;  $f_{\text{б.}}$  – площадь водосбора, занятая болотами, %;  $I_{\text{ср.р.}}$  – средний уклон реки, ‰;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  – коэффициенты, отражающие, соответственно, степень влияния озерности, залесенности, заболоченности водосбора, среднего уклона реки на максимальный сток весеннего половодья и изменяющиеся для исследуемой территории в пределах:  $n_1 - 0,02 \dots 0,06$ , ( $n_{1\text{ср.}} = 0,04$ );  $n_2 - 0,07 \dots 0,11$ , ( $n_{2\text{ср.}} = 0,09$ );  $n_3 - 0,02 \dots 0,06$ , ( $n_{3\text{ср.}} = 0,04$ );  $n_4 - 0,25 \dots 0,54$ , ( $n_{4\text{ср.}} = 0,395$ ).

Теснота связи наблюдаемых и рассчитанных по уравнению (1) максимальных значений стока весеннего половодья достаточно высокая, коэффициент корреляции связи  $R = 0,835 \pm 0,022$ . Проверка модели осуществлялась по независимым материалам и показала, что в 15 % случаев ошибка, с которой рассчитываются нормы максимальных расходов воды рек весеннего половодья, не превышает  $\pm 5$  %, в 45 % случаев –  $\pm 15$  %, в 25 % случаев –  $\pm 40$  %, и ошибки более  $\pm 40$  % – составляют 15 % случаев.

Для двух генеральных совокупностей (наблюдаемых и рассчитанных значений) определен критерий Фишера ( $F$ ), значение кото-

рого составило 2,17, что больше критического значения  $F_{кр}=1,5$  при уровне значимости  $\alpha=5\%$ . Соответственно, предлагаемая физико-математическая модель позволяет рассчитывать с достаточной, для практических целей, точностью среднее многолетнее значение максимального стока весеннего половодья.

Зависимость максимальных расходов воды от таких параметров, как широта, долгота и средняя высота центра водосбора очевидна из-за географической зональности распределения основных гидролого-климатических показателей, поэтому, в формуле (1) единичный максимальный мгновенный расход весеннего половодья с элементарного бассейна ( $\bar{q}_{max}$ ) является комплексным параметром, интегрирующим влияние основных стокоформирующих характеристик (атмосферных осадков, суммарного испарения, почвенного покрова, температуры воздуха и др.).

Величина максимального за период половодья расхода талых вод находится в прямой зависимости от общего направления уклона водосборной площади и среднего уклона реки. Чем больше средний уклон реки, тем выше расход весеннего половодья в данном створе (для территории Беларуси –  $\delta_3=1,01\dots 3,36$ ).

Озера и болота оказывают регулирующее воздействие на режим стока рек – они способствуют снижению максимального стока и выполаживанию половодья. Снижение максимальных расходов в лесных бассейнах зависит от степени дренирования подземных вод. В лесу снег тает с меньшей интенсивностью и с некоторым запаздыванием по сравнению с полем. Талая вода задерживается на поверхности и затем большей частью фильтруется в почвогрунты, то есть лес способствует переводу поверхностного стока в подземный, за счет этого максимальные расходы весеннего половодья на водосборах малых рек понижаются при полном облесении водосбора до 5 и более раз (данные Важнова А.Н. [7]).

Максимальный сток половодья малых рек Беларуси заданной вероятности превышения ( $Q_{max P\%}$ ) определяется по трем статистическим параметрам: среднемноголетнему максимальному стоку весеннего половодья ( $\bar{Q}_{max}$ ), коэффициентам вариации ( $C_V$ ) и асимметрии ( $C_S$ ). Норму  $\bar{Q}_{max}$  предлагается рассчитывать по зависимости (1).

Нахождение  $C_V$ ,  $C_S$  и соотношения  $C_S/C_V$  по имеющимся рядам наблюдений осуществляется с большими ошибками из-за недостаточной их длины – максимальная длина ряда из 110 исследуемых малых рек (створов) – 45 лет, средняя – 22 года. Поэтому, при оценке статистических параметров максимального стока весеннего половодья нами использовался метод годовпунктов, как наиболее полно учитывающий пространственно-временные изменения гидрологических характеристик исследуемого ряда. Суть метода годовпунктов состоит в построении эмпирической кривой обеспеченности по совокупности, полученной при объединении статистически однородных независимых временных рядов случайной величины  $X$  (в нашем случае максимальных расходов весеннего половодья) в  $m$  - пунктах наблюдений (створах) в один пространственно-временной ранжированный ряд  $(X_{n_1}, X_{n_2}, \dots, X_{n_m})$

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N \quad (N=n_1+n_2+\dots+n_m), \quad (7)$$

где  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  – исследуемая совокупность членов статистически однородных временных рядов, объединенных в единый пространственно-временной ранжированный ряд;  $N = n_1+n_2+\dots+n_m$  – продолжительность периода наблюдений на соответствующих станциях (створах).

По объединенному ряду строится эмпирическая кривая обеспеченности и определяются оценки статистических параметров.

Совместное рассмотрение материалов наблюдений значительно увеличило объем информации, на которую опираются суждения о закономерностях колебаний максимального стока весеннего половодья: при таком рассмотрении вместо одного ряда данных, характеризующего гидрологический режим отдельно взятой малой реки, анализу подвергались результаты наблюдений на 2409 годовпунктах по 110 малым рекам Беларуси. Исследование проведено с учетом результатов районирования малых рек по принадлежности к бассейнам крупных рек и в целом для территории Беларуси (таблица 2).

При практическом применении метода годовпунктов важной является оценка однородности рассматриваемых выборок. Проверка однородности объединенных рядов осуществлена по критерию Колмогорова с использованием метода сравнения частных кривых обеспеченности с объединенной кривой. В данном случае, в качестве

ве заданного (теоретического) закона распределения вероятностей выступает кривая обеспеченности объединенного ряда, построенная без участия параметров, определенных по сравниваемой с ней выборке.

Таблица 2 Краткая характеристика исходных выборок при исследовании максимальных расходов воды весеннего половодья малых рек Беларуси

Бассейн реки	Число расчетных створов (рек)	Число годопунктов	Среднее количество лет наблюдений по одной реке (створу)
Западная Двина	22	470	21,4
Неман	24	484	20,2
Западный Буг	4	99	24,8
Днепр	60	1356	22,6
Вся территория Беларуси	110	2409	21,9

Суть оценки однородности с использованием критерия Колмогорова заключается в сравнении рассчитанного для максимального отклонения между эмпирической и теоретической кривой распределения уровня значимости  $\alpha$  и критического его значения  $\alpha_{кр.}$ , которое для исследуемых выборок принято равным 5 %. Полученные уровни значимости для максимальных отклонений между эмпирической и теоретической кривой распределения вероятностей максимальных расходов весеннего половодья для исследуемых выборок приведены в таблице 3.

Анализ материалов таблицы 3 показывает, что все объединенные ряды имеют уровни значимости  $\alpha > \alpha_{кр.} = 5\%$ , что свидетельствует об однородности выборок, и о возможности оценки коэффициентов вариации ( $C_V$ ) и асимметрии ( $C_S$ ) методом моментов (таблица 4):

$$C_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{(n-1)}}, \quad (9)$$

$$C_S = n \sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3 / [(n-1)(n-2)C_V^3], \quad (10)$$

где  $K_i$  – модульные коэффициенты;  $n$  – длина исследованного ряда.

Таблица 3 Уровни значимости ( $\alpha$ ) исходных выборок при исследовании максимальных расходов весеннего половодья малых рек Беларуси

Бассейн реки	Уровень значимости ( $\alpha$ ), %
Западная Двина	12,6
Неман	8,6
Западный Буг	76,8
Днепр	28,1
Вся территория Беларуси	8,8

Таблица 4 Коэффициенты вариации ( $C_V$ ) и асимметрии ( $C_S$ ) для исследованных объединенных выборок и соотношение ( $C_S/C_V$ )

Бассейн реки	Количество членов ряда	$C_V$	$C_S$	$C_S/C_V$
1	2	3	4	5
Западная Двина	470	0,58	1,36	2,5 (2,35)
Неман	484	0,72	1,47	2,0 (2,03)
Западный Буг	99	0,63	0,79	1,0 (1,25)
Днепр	1356	0,68	1,23	2,0 (1,80)
Вся территория Беларуси	2409	0,67	1,30	2,0 (1,94)

*Примечание: в графе 5 приведены округленные по ближайшим стандартным значениям соотношения  $C_S/C_V$ , в скобках - реальные значения.*

Анализ материалов таблицы 4 показывает, что в целом для территории Беларуси коэффициент вариации максимальных расходов весеннего половодья изменяется в пределах от 0,58 до 0,72, коэф-

коэффициент асимметрии – от 0,79 до 1,47, а их соотношение от - 1,0 до 2,5. Это свидетельствует о больших различиях в гидролого-климатических условиях на водосборах малых рек Беларуси и необходимости вести расчеты максимальных расходов весеннего половодья с учетом их приуроченности к бассейнам крупных рек.

Определение коэффициентов вариации максимального стока весеннего половодья при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на малых реках Беларуси, можно осуществлять по зависимости

$$C_v = \frac{a}{\bar{Q}_{\max}^{0,03} \cdot (A + 100)^{0,03} \cdot (f_{\text{оз.}} + 1)^{0,11}}, \quad (11)$$

где  $a$  – параметр, определяемый обратным путем по данным реки-аналога.

По найденным величинам –  $\bar{Q}_{\max}$ ,  $C_v$  и  $C_s/C_v$  определяется расчетный максимальный расход воды весеннего половодья заданной вероятности превышения

$$Q_P = K_P \cdot \bar{Q}_{\max}, \quad (12)$$

где  $K_P$  – ордината кривой трехпараметрического гаммараспределения, определяемая по стандартным таблицам.

Сравнительная оценка рассчитанных по предлагаемой методике обеспеченных величин максимальных расходов весеннего половодья с рассчитанными по наблюдаемым значениям для ежегодных вероятностей превышения 5 % и 10 % приведена на рисунке 1.

Поверочные расчеты, выполненные с привлечением независимых исходных данных, показали, что рассчитанные по предлагаемой методике значения максимальных расходов весеннего половодья (как норм, так и обеспеченных величин) с достаточной для практических целей точностью соответствуют измеренным величинам.

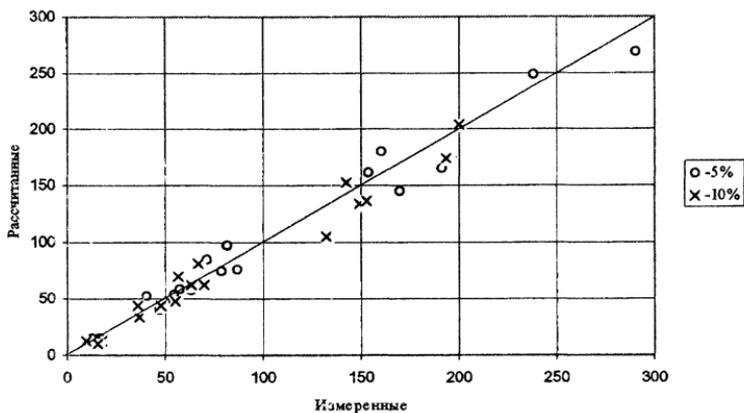


Рисунок 1 – Графики связи рассчитанных и измеренных величин максимального стока весеннего половодья вероятностью превышения 5% и 10% (м<sup>3</sup>/с)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гидрология суши. Термины и определения: ГОСТ 19179–73. – Москва, 1973. – 34 с.
2. Определение расчетных гидрологических характеристик: СНиП 2.01.14–83. – Москва: Госстрой СССР: Стройиздат, 1985. – 36 с.
3. Определение расчетных гидрологических характеристик Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Пособие к строительным нормам и правилам: П1–98 к СНиП 2.01.14–83 / Н.В. Шевцов, Н.А. Мишустин, В.Е. Валуев, А.А. Волчек, В.В. Лукша, О.П. Мешик, В.Ю. Цилиндь // Введ. 01.08.1999. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2000. – 181 с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1966. – Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – Ч. 2: Основные гидрологические характеристики. – 720 с.
5. Основные гидрологические характеристики (за 1963-1970 гг. и весь период наблюдений). – Ленинград: Гидрометеоздат, 1974. – Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – 432 с.

6. Основные гидрологические характеристики (за 1971-1975 гг. и весь период наблюдений). – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – 504 с.

7. Важнов, А.Н. Гидрология рек / А.Н. Важнов. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 329 с.

8. Исследование и расчеты речного стока / под ред. В.Д. Быкова. – Москва: Изд-во МГУ, 1981. – 228с.

*УДК 556.162 "45" (476)*

В.Е. Валуев, А.А. Волчек, О.П. Мешик, В.Ю. Цилиндя

## **ВНУТРИГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ КОМПОНОВКИ**

Определение основных параметров водохозяйственных объектов и систем осуществляется с учетом закономерностей внутригодичного хода стока рек по календарным периодам (месяцам или декадам), сезонам (весенний, летне-осенний, меженный и др.) и внутри их.

Распределение величин стока в году – сложная научно-практическая задача, связанная с оценкой влияния на сток комплекса физико-географических факторов. Наряду с климатическими факторами, на сток влияют площадь, рельеф, озерность, залесенность, заболоченность бассейна, местные гидрографические условия, что в итоге обуславливает естественную зарегулированность стока на водосборе. К этому необходимо добавить возможность трансформации стока в рассматриваемом бассейне в результате хозяйственной деятельности человека. Характер внутригодичного хода величин стока для одного и того же створа реки значительно изменяется в разрезе реальных лет. Расчетное внутригодичное распределение стока должно максимально точно отражать природные соотношения между составляющими величинами стока в отдельные периоды года, обеспечивать гарантированную безаварийную работу водохозяйственных сооружений и установок в критические периоды и сезоны.

При наличии данных наблюдений ( $\geq 15$  лет) в практике гидрологических расчетов внутригодичные величины стока получают одним

из двух способов: распределением стока по аналогии с реальным годом; методом компоновки стока отдельных периодов и сезонов. Обоснованный выбор расчетного года из числа наблюдаемых, даже при наличии длительного ряда, затруднителен или невозможен. При использовании способа "реальных лет" сказывается субъективизм исследователя, затруднена автоматизация расчетов. Здесь наиболее приемлемо внутригодовое распределение стока путем его компоновки за отдельные части года при статистической обработке реальных расходов воды. Статистические схемы компоновки величин стока способны дать объективную картину внутригодового распределения, если используются его значения реальной обеспеченности как для года в целом, так и для лимитирующих сезонов.

По результатам исследования стока рек Беларуси, нами предлагается методика моделирования внутригодового его распределения, базирующаяся на более точном описании естественных процессов стокообразования. В основе методики лежит явление асинхронности стока ( $Q$ ), смысл которого раскрывается соотношением:

$$K_{ac.i} = \frac{\sum Q_{xp.i}}{\sum Q_{pb.i}}, \quad (1)$$

где  $K_{ac.i}$  – коэффициент асинхронности характеристик хронологического и равнообеспеченного стока (месячные, сезонные, годовые величины);  $\sum Q_{xp.i}$  и  $\sum Q_{pb.i}$  – суммарное значение, соответственно, хронологического и равнообеспеченного стока (месячные, сезонные, годовые величины).

Исследуя величины  $K_{ac.i}$ , мы получили устойчивые связи типа  $K_{ac.i} = f(P, A_i)$ , которые описываются полиномом вида:

$$K_{ac.i} = A_1 \cdot P^3 + A_2 \cdot P^{2,5} + A_3 \cdot P^2 + A_4 \cdot P^{1,5} + A_5 \cdot P + A_6 \cdot P^{0,5}, \quad (2)$$

где  $P$  – расчетная обеспеченность величин годового стока, %;  $A_i$  – коэффициенты регрессии в полиноме (2), приведенные в таблице 1. В таблице 1 представлены параметры уравнений типа (2), полученные в результате регрессионного анализа годового стока по основным рекам Беларуси для створов, имеющих ряды наблюдений 100 и более лет. О возможности практических расчетов, с достаточной степенью точности, месячных, сезонных, годовых величин стока свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции ( $R=0,98...0,99$ ) предлагаемых связей,  $K_{ac.i} = f(P, A_i)$ .

Таблица 1 Параметры уравнения вида  $K_{acc,i}=f(P, A_i)$

Река – створ	Параметр	Месячные величины параметров $A_i$ в полиноме (2)				
		I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6	7
Ипадная Длина - Штебск	A1	-0.00011	-0.00007	-0.00007	-0.00011	-0.00006
	A2	0.00381	0.00252	0.00242	0.00361	0.00224
	A3	-0.04957	-0.03661	-0.03473	-0.04778	-0.03247
	A4	0.31510	0.25053	0.24329	0.31211	0.23031
	A5	-1.01392	-0.86820	-0.85515	-1.03841	-0.83194
	A6	1.56530	1.44347	1.42552	1.63971	1.44845
Неман - Гродно	A1	-0.00005	-0.00007	-0.00009	-0.00008	-0.00008
	A2	0.00206	0.00237	0.00293	0.00268	0.00289
	A3	-0.03088	-0.03384	-0.03883	-0.03782	-0.04028
	A4	0.22770	0.23973	0.25730	0.26414	0.27864
	A5	-0.85384	-0.86767	-0.88412	-0.94320	-0.98725
	A6	1.50874	1.49321	1.47973	1.59105	1.64962
Днепр - Речица	A1	0.00000	-0.00007	0.00000	-0.00006	-0.00011
	A2	0.00023	0.00225	0.00038	0.00212	0.00358
	A3	-0.00646	-0.03058	-0.01115	-0.03071	-0.04739
	A4	0.07053	0.20672	0.11954	0.21902	0.30943
	A5	-0.36773	-0.72591	-0.57550	-0.80408	-1.03414
	A6	0.94065	1.28065	1.22690	1.43507	1.65153
Сож - Славгород	A1	0.00000	0.00000	0.00005	-0.00053	0.00000
	A2	0.00022	0.00036	-0.00135	0.00194	0.00029
	A3	-0.00628	-0.00974	0.01004	-0.02797	-0.00878
	A4	0.06875	0.09914	0.00000	0.20252	0.10046
	A5	-0.36250	-0.46376	-0.27012	-0.76420	-0.52663
	A6	0.93744	1.02774	0.95000	1.40820	1.23045
Березина - Юбруйск	A1	-0.00005	-0.00005	-0.00004	-0.00010	-0.00011
	A2	0.00178	0.00183	0.00130	0.00341	0.00347
	A3	-0.02575	-0.02656	-0.01940	-0.04503	-0.04533
	A4	0.18283	0.19017	0.14858	0.29559	0.29562
	A5	-0.67204	-0.70212	-0.60260	-1.00113	-1.00084
	A6	1.24678	1.28611	1.21445	1.62826	1.63336
Припять - Мозырь	A1	-0.00009	-0.00007	-0.00008	-0.00008	-0.00011
	A2	0.00309	0.00555	0.00268	0.00269	0.00359
	A3	-0.04277	-0.06908	-0.03552	-0.03698	-0.04732
	A4	0.29219	0.41920	0.23705	0.25430	0.30870
	A5	-1.01460	-1.28214	-0.83183	-0.90546	-1.03028
	A6	1.65141	1.83792	1.43400	1.54777	1.64108

Месячные величины параметров $A_i$ в полиноме (2)						
VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
8	9	10	11	12	13	14
-0.00007	-0.00006	0.00009	-0.00006	-0.00006	-0.00011	-0.00011
0.00263	0.00201	0.00201	0.00220	0.00212	0.00358	0.00368
-0.03641	-0.02905	-0.04091	-0.03147	-0.02980	-0.04608	-0.04842
0.24771	0.21063	0.27804	0.22607	0.20082	0.29406	0.31289
0.86466	-0.79445	-0.96961	-0.84293	-0.74548	-0.97000	-1.02615
1.46903	1.44958	1.60916	1.50922	1.38537	1.56237	1.60297
-0.00006	-0.00008	-0.00009	-0.00010	-0.00009	-0.00005	-0.00004
0.00220	0.00288	0.00314	0.00331	0.00319	0.00172	0.00157
-0.02998	-0.04015	-0.04164	-0.04439	-0.04252	-0.02486	-0.02366
0.20611	0.27481	0.27421	0.29371	0.28017	0.18053	0.17733
-0.74769	-0.95412	-0.93294	-0.99445	-0.94791	-0.69097	-0.68901
1.35994	1.56984	1.54561	1.61328	1.55509	1.32007	1.31398
-0.00008	-0.00007	-0.00010	-0.00009	-0.00007	0.00000	-0.00007
0.00285	0.00234	0.00331	0.00302	0.00235	0.00038	0.00259
-0.03853	-0.03124	-0.04380	-0.04022	-0.03196	-0.01062	-0.03600
0.26128	0.21208	0.28676	0.26738	0.21845	0.11311	0.24679
-0.92061	-0.76609	-0.96492	-0.92275	-0.78626	-0.55451	-0.86305
1.56410	1.38849	1.56820	1.54587	1.40745	1.22659	1.45009
-0.00006	-0.00006	-0.00005	0.00000	0.00000	0.00002	0.00001
0.00230	0.00230	0.00204	0.00051	0.00043	0.00000	0.00000
-0.03420	-0.03474	-0.03183	-0.01381	-0.01165	-0.00655	-0.00653
0.24892	0.25287	0.23710	0.14002	0.11956	0.11566	0.09266
-0.91526	-0.91595	-0.87734	-0.64631	-0.56707	-0.59693	-0.50421
1.57457	1.54471	1.51405	1.33535	1.23243	1.29544	1.17005
-0.00009	-0.00007	-0.00007	-0.00003	-0.00005	-0.00006	-0.00011
0.00309	0.00171	0.00237	0.00132	0.00172	0.00221	0.00351
-0.04090	-0.02460	-0.03354	-0.02104	-0.02431	-0.03053	-0.04574
0.27064	0.17962	0.23484	0.16656	0.17391	0.21234	0.29463
-0.93121	-0.69459	-0.84730	-0.68154	-0.66568	-0.77852	-0.97769
1.55847	1.33610	1.48204	1.34888	1.29368	1.41273	1.56084
-0.00007	-0.00007	-0.00006	-0.00007	-0.00005	0.00038	-0.00006
0.00245	0.00218	0.00215	0.00259	0.00206	-0.01068	0.00230
-0.03537	-0.03276	-0.03183	-0.03606	-0.03025	0.11268	-0.03235
0.25415	0.24066	0.23038	0.24766	0.21928	-0.55239	0.22878
-0.91001	-0.89347	-0.84663	-0.87421	-0.81611	-0.55239	-0.83967
1.55851	1.55523	1.48126	1.49438	1.46289	1.23231	1.47930

В результате исследований внутригодовой асинхронности установлены регрессионные зависимости месячных величин стока от его годового значения  $Q_m = f(Q_g)$  по изучаемым створам основных рек Беларуси. При этом обнаружена для ряда рек (месяцев) достаточно тесная их связь ( $R > 0,8$ ) (рисунок 1), согласно полученным данным, в среднем для территории Беларуси.

Коэффициенты корреляции связей  $Q_m = f(Q_g)$  изменяются от 0,1 (март) до 0,65 (апрель). Лишь в январе-марте средние значения их величины опускаются ниже уровня значимости, когда  $R < 0,31$  (рисунок 1). В остальные периоды связи месячных и годовых величин стока – устойчивые.

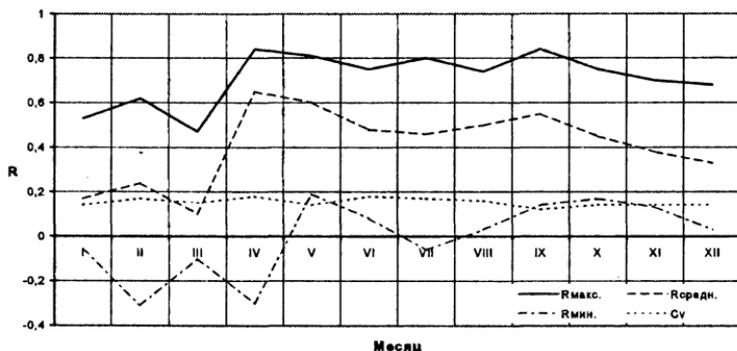


Рисунок 1 – Коэффициенты корреляции (R) месячных расходов воды с годовыми расходами воды рек Беларуси:

1 – максимальные; 2 – средние; 3 – минимальные; 4 – коэффициент вариации

С целью общего повышения устойчивости анализируемых связей, выполнено совместное ранжирование модульных коэффициентов ( $K_{м.і}$ ) месячных и годовых величин стока. В этом случае, по всем изученным створам и для всех месяцев гидрологического года получены высокие значения коэффициентов корреляции модульных коэффициентов ( $K_{м.і}$ ), что дало основание предложить рабочее уравнение вида

$$K_{м.і} = \frac{Q_{м.і}}{Q_{м.ср.}} = \alpha \cdot \left( \frac{Q_{г.і}}{Q_{г.ср.}} \right)^\beta, \quad (3)$$

в котором  $Q_{m,i}$  и  $Q_{г,i}$  – средние месячные и годовые равнообеспеченные расходы;  $Q_{m.cр.}$  и  $Q_{г.cр.}$  – среднее значение, соответственно, месячного и годового стока за расчетный период, которые определяются по аналогичной схеме:

$$Q_{г.cр.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{г,i}, \quad (4)$$

где  $n$  – длина ряда наблюдений;  $Q_{г.cр.}$  – среднее годовое значение стока ранжированного ряда и его норма;  $\alpha$ ,  $\beta$  – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2.

Используя предлагаемую методику (зависимости 1, 2, 3) и соответствующий алгоритм, нами разработана компьютерная программа внутригодового распределения стока при наличии данных наблюдений, которая входит в программный комплекс “Гидролог” и работает совместно с базой данных гидрологической информации.

Задача решается в следующей последовательности:

1. Выбирается расчетный период из имеющегося ряда наблюдений, формируется матрица месячных и годовых расходов воды (стока) по расчетному створу.

2. По месячным и годовым значениям стока, формируется матрица модульных коэффициентов (подобно соотношению 3).

3. Формируется матрица коэффициентов асинхронности стока с годовыми значениями при использовании зависимости типа (1).

4. Формируется матрица коэффициентов ( $A_i$ ) зависимости типа (2) по данным матрицы коэффициентов асинхронности (пункт 3).

5. Формируется матрица ранжированных модульных коэффициентов месячных и годовых значений стока.

6. Рассчитываются значения параметров зависимости (3) с использованием данных матрицы (пункт 5) ранжированных модульных коэффициентов месячных и годовых значений стока.

7. Строится теоретическая кривая распределения вероятностей годовых расходов воды реки, определяется модульный коэффициент соответствующей расчетной обеспеченности.

8. Определяются модульные коэффициенты месячных значений стока расчетной обеспеченности (зависимость 3).

9. Определяются коэффициенты асинхронности (зависимость 2) месячных модульных коэффициентов с годовыми модульными коэффициентами расчетной обеспеченности.

10. Уточняются модульные коэффициенты месячных значений стока с помощью соотношения (1).

11. Определяются месячные величины стока по схеме —

$$Q_{м.р\%} = K_{м.і} \cdot Q_{м.ср} \cdot$$

12. Выполняется корректировка месячных расходов путем сопоставления их суммы с годовыми значениями и разверстки невязки пропорционально месячным величинам стока.

Сравнение полученных нами материалов по распределению стока с данными гидрометрических наблюдений на реках Беларуси свидетельствует о высокой точности и надежности предлагаемого метода в сочетании с возможностью автоматизации процесса определения внутригодовых величин стока любой расчетной обеспеченности.

В таблице 3 представлена модель внутригодового распределения стока различной обеспеченности, рассчитанная на основе анализа экспериментальных данных за период 1950-1970 гг. (река Неман, расчетный створ — Гродно).

Результаты исследований хорошо корреспондируют с данными ранее выполненными работ, в частности [2], но возможность варьировать обеспеченность расчетных характеристик, наряду с высокой точностью их определения, дает основания рекомендовать к широкому практическому (возможно параллельному) использованию предлагаемой методики.

Данный подход апробирован при проектировании сооружений гидромелиоративных систем в зоне Брестского Полесья. Всего выполнено более 120 инженерных расчетов, результаты которых нашли практическое применение.

Таблица 2 Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и степень тесноты связи (R) в уравнении типа (3)

Река – пункт	Параметры	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Западная Двина – Витебск	$\alpha$	0,907	0,990	0,801	0,991	0,924	0,908	0,865	0,814	0,803	0,786	0,831	0,868
	$\beta$	2,205	2,017	2,781	1,205	1,979	1,994	2,313	2,656	2,712	2,933	2,833	2,625
	R	0,987	0,983	0,977	0,989	0,989	0,979	0,974	0,967	0,973	0,973	0,974	0,985
Неман – Гродно	$\alpha$	0,948	0,936	0,918	0,940	0,961	0,979	0,976	0,965	0,964	0,957	0,950	0,964
	$\beta$	0,208	2,499	2,890	2,524	2,028	1,637	1,759	1,962	1,876	2,045	2,255	2,050
	R	0,986	0,986	0,965	0,993	0,985	0,981	0,988	0,990	0,973	0,982	0,990	0,991
Днепр – Речица	$\alpha$	0,982	0,979	0,908	0,958	0,950	0,947	0,963	0,943	0,973	0,976	0,939	0,958
	$\beta$	1,440	1,446	2,335	1,900	2,033	1,844	1,632	1,809	1,518	1,487	2,155	1,857
	R	0,989	0,986	0,974	0,987	0,993	0,972	0,970	0,954	0,976	0,977	0,992	0,983
Сож – Славгород	$\alpha$	0,979	0,964	0,780	0,930	0,918	0,928	0,900	0,951	0,910	0,956	0,941	0,963
	$\beta$	1,328	1,486	3,088	2,063	1,889	1,610	1,936	1,759	1,768	1,605	1,773	1,633
	R	0,978	0,982	0,977	0,969	0,986	0,950	0,970	0,992	0,969	0,990	0,988	0,981
Березина – Бобруйск	$\alpha$	0,979	0,974	0,906	0,955	0,955	0,969	0,957	0,963	0,966	0,976	0,966	0,970
	$\beta$	1,596	1,640	2,677	2,153	2,066	1,798	1,932	1,791	1,733	1,637	1,902	1,795
	R	0,984	0,971	0,952	0,973	0,990	0,990	0,974	0,966	0,976	0,975	0,978	0,956
Припять – Мозырь	$\alpha$	0,907	0,903	0,867	0,955	0,977	0,979	0,943	0,931	0,942	0,948	0,928	0,931
	$\beta$	1,678	1,777	2,150	1,530	1,306	1,314	1,536	1,591	1,479	1,439	1,584	1,622
	R	0,968	0,978	0,985	0,993	0,997	0,994	0,968	0,964	0,969	0,970	0,970	0,979

Таблица 3 – Внутригодовое распределение стока р. Неман, Гродно, %

Месяцы	Обеспеченность, %							
	5	10	25	50	67	75	90	95
Январь	3.2	3.23	3.36	3.61	3.87	4.05	4.86	5.88
Февраль	5.47	5.5	5.62	5.82	6.02	6.17	6.82	7.64
Март	15.69	15.85	15.84	15.71	15.51	15.37	14.77	13.90
Апрель	33.65	33.4	32.64	31.31	29.95	28.97	24.67	19.30
Май	9.45	9.38	9.33	9.28	9.25	9.23	9.15	9.09
Июнь	4.93	4.92	4.98	5.11	5.26	5.37	5.84	6.44
Июль	2.93	2.92	2.97	3.08	3.2	3.29	3.67	4.15
Август	2.96	2.97	3.06	3.22	3.39	3.52	4.06	4.76
Сентябрь	2.73	2.73	2.79	2.92	3.06	3.16	3.60	4.16
Октябрь	4.02	4.05	4.17	4.40	4.63	4.81	5.55	6.50
Ноябрь	9.08	9.14	9.19	9.25	9.3	9.33	9.49	9.66
Декабрь	5.88	5.92	6.05	6.3	6.55	6.73	7.52	8.52
Год	100	100	100	100	100	1000	100	100

УДК 631.626

С.А. Дубенок, А.Н. Колобаев, Е.М. Минченко (БНТУ)

## **МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Подавляющее число измерений гидрохимических характеристик как природных, так и сточных вод выполняется со значительными погрешностями, которые оказывают существенное влияние на дальнейшую обработку результатов наблюдений и принятие решений органами управления водоохранной деятельностью. Если качество природных вод складывается под воздействием двух составляющих – природной (естественный фон) и антропогенной, первая из которых формирует основные физико-химические свойства воды данного региона, а вторая только накладывает определённый отпечаток на эти свойства, то качественные характеристики сточных вод являются функцией разнонаправленного антропогенного воздейст-

вия. Следовательно, качественные характеристики поверхностных вод относительно стабильны, поскольку в основе их формирования лежит величина сравнительно постоянного характера. Состав сточных вод отличается более широким диапазоном изменения, как по набору гидрохимических показателей, так и по их количественным характеристикам. Этот диапазон зависит от условий формирования сточных вод, которые можно разделить на следующие категории:

- хозяйственно-бытовые сточные воды;
- промышленные сточные воды
- сточные воды от животноводческих и птицеводческих объектов и предприятий по переработке продуктов животноводства;
- поверхностно - ливневые стоки;
- дренажные, шахтные и карьерные сточные воды [2].

Для хозяйственно-бытовых сточных вод характерно относительно стабильное качество (при соблюдении норм водопользования). Эти стоки отличаются высоким уровнем концентрации взвешенных частиц и органических веществ.

Стоки промышленных предприятий характеризуются широким спектром загрязняющих веществ, зависящим от специфики производства, но относительно стабильными концентрациями в рамках установленного диапазона.

В крупных городах и промышленных центрах республики широко практикуется совместная очистка промышленных стоков (после локальной очистки) и хозяйственно-бытовых сточных вод на общегородских очистных сооружениях. В результате формируется новый тип стоков – городские смешанные (промышленно-бытовые) сточные воды. Состав и свойства промышленно-бытовых сточных вод определяются соотношением хозяйственно - бытовых и промышленных стоков и спецификой предприятий, формирующих эти стоки. Основные трудности при контроле их качественного состава возникают в связи с тем, что в составе этих вод имеются разнообразные органические и неорганические вещества, которые сами по себе могут быть как основными загрязнителями, так и служить основой для создания других, возможно, более опасных веществ.

Сточные воды от животноводческих и птицеводческих комплексов имеют высокое органическое и микробное загрязнение.

Для поверхностно - ливневых вод характерна неравномерность объема по сезонам года, а уровень содержания основных загрязне-

нителей зависит от степени благоустройства территории, транспортных нагрузок, производственной ориентации промышленных предприятий и т.д. [3]. Перечень загрязняющих веществ, выносимых поверхностным стоком с урбанизированных территорий, весьма широк и зависит, прежде всего, от функционального назначения водосборного коллектора. По условиям формирования загрязненного поверхностного стока его можно разделить на две основные категории: сток с селитебной территории и сток с площадок промышленных предприятий.

Сток с селитебной территории характеризуется повышенным содержанием взвешенных веществ, нефтепродуктов и растворимых примесей в виде солей органического происхождения, особенно азота и фосфора. Поверхностный сток с промплощадок по своему составу может существенно отличаться в зависимости от технологии производства, организации складского хозяйства, наличия локальных очистных сооружений и других производственных факторов. Диапазон загрязняющих веществ (и их концентраций) в этом стоке чрезвычайно широк.

В результате, все разрабатываемые методы контроля за достоверностью информации о составе сточных вод должны изначально базироваться на дифференциации сточных вод. Основной задачей системы контроля является идентификация грубых ошибок в гидрохимических данных. Грубые ошибки, как правило, представляют собой необоснованно высокие (низкие) концентрации содержания загрязняющих веществ в сточных водах. Другими словами, это резко выделяющиеся значения из относительно однородного массива данных. При наличии достаточно длинного ряда наблюдений (не менее 35 значений) отметить резко выделяющиеся значения возможно при помощи методов математической статистики. Однако, на сегодняшний день в Республике Беларусь контроль качества сбрасываемых сточных вод промышленными и коммунально-бытовыми предприятиями проводится эпизодически, причем количество отбираемых проб колеблется от 1-2 до 10-12 в год. При условии такого короткого ряда наблюдений ошибочные значения идентифицировать крайне сложно, а для оценки достоверности данных единичной пробы это практически невозможно.

Наиболее эффективным элементом контроля в данной ситуации может являться проверка данных результатов гидрохимических ана-

лизов сточных вод на попадание в диапазон экстремально возможных значений гидрохимических показателей. Для сточных вод по 37 показателям авторами данной работы определены интервалы экстремальных значений. Причем, интервалы для промышленных и коммунально-бытовых сточных вод дифференцированы для основных (наиболее характерных) выпусков, на которых производится отбор проб – выпуск в горканыализацию, вход на очистные сооружения, выход с очистных сооружений и выпуск в водный объект. Таким образом, охвачены все места отбора проб сточных вод. Экстремальные значения по шести из 37 показателей приведены в таблице 1.

За нижнюю границу или минимум приняты, как правило, минимальные значения показателей, определенные согласно «Перечню методик выполнения измерений, допущенных к применению в деятельности лабораторий экологического контроля предприятий и организаций Республики Беларусь» и «Дополнений к перечню методик выполнения измерений, допущенных к применению в деятельности лабораторий экологического контроля предприятий и организаций Республики Беларусь», с погрешностью методики выполнения измерений не более 50 %. Минимальные значения подлежат корректировке согласно изменениям, вносимым в вышеуказанные документы.

Верхняя граница или максимум установлен для каждого типа выпуска сточных вод индивидуально. При этом, максимальные значения приняты по «огигающей», как максимумы из следующих:

- фактические максимальные концентрации (из имеющейся базы данных), прошедшие статистическую обработку и не отнесенные к категории «сомнительных»;
- фактические максимальные концентрации, зафиксированные в литературных источниках;
- нормативные концентрации в сбросах, классифицирующихся как аварийные;
- максимальные значения верхних пределов определения элементов, согласно вышеупомянутому «Методикам выполнения измерений» (для элементов, которые не могут быть определены с использованием  $n$ -кратного разбавления сточных вод);
- максимально допустимые значения, регламентированные правилами приема промышленных и коммунально-бытовых сточных вод в горканыализацию, а также правилами приема сточных вод на очистные сооружения.

Таблица 1 – Экстремальные значения гидрохимических показателей

Показатели	Значения показателей, мг/куб. дм									
	Сточные воды на входе очистных сооружений								Природные воды	
	на выпусках в горканализа- цию и водный объект без очи- стки		на входе очи- стных соору- жений		на выходе очи- стных сооруже- ний и на выпуске в водный объект после очистки		ливневые воды (на выпусках в горканализа- цию и водный объект без очи- стки)			
	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.		
БПК5	0,3	1800	0,3	2000	0,3	400	0,3	1800	0,3	100
Нефтепродукты	0,005	45	0,005	50	0,005	6,5	0,005	40	0,005	2,5
Взвешенные вещества	0,1	1200	0,1	1500	0,1	800	0,1	3000	0,1	300
Фосфаты	0,01	50	0,01	70	0,01	40	0,01	30	0,01	20
Азот аммонийный	0,015	120	0,015	150	0,015	85	0,015	40	0,015	30
СПАВ (анион.)	0,01	10	0,01	20	0,01	6	0,01	10	0,01	5

Максимум для поверхностных вод (включающих ливневые, талые и поливомоечные воды) был установлен теоретически с учетом преобладающих элементов в ливневых водах, степени их токсичности и данных о качестве ливневых сбросов по всей Республике Беларусь.

Вышеизложенный способ оценки достоверности гидрохимических данных может функционировать как самостоятельный (доминирующий) элемент системы контроля, но более эффективен в сочетании с другими взаимодополняющими способами контроля.

Для контроля данных о качестве природных вод достаточно эффективной является проверка на экстремальные величины гидрохимических показателей и проверка, основанная на выполнении прямых и обратных зависимостей, которые существуют между элементами: БПК <ХПК, азот аммонийный> азота нитритного и т.д. [1]. Следовательно, одним из способов повышения достоверности гидрохимической информации будет установление закономерностей между различными показателями качества природных вод.

Данные, не попадающие в заданные интервалы экстремально возможных значений, признаются ошибочными.

В результате оценки на достоверность ретроспективного массива данных гидрохимических анализов сточных вод с помощью предложенного элемента контроля было выявлено около 2,5% ошибочных значений гидрохимических показателей.

В отличие от эпизодического контроля за качеством сточных вод, регулярное измерение гидрохимических показателей поверхностных вод приводит к накоплению данных, необходимых для статистической оценки. При изучении химического состава природных вод, как правило, имеется сравнительно большой объем количественной информации. Это позволяет применять методы математической статистики: на основе корреляционного и регрессионного анализов можно оценивать и анализировать статистические связи элементов водной среды. Первый вид анализа позволяет выявить наличие связи между показателями, а второй – описать эту связь с помощью уравнения. В данной работе главное внимание было уделено выявлению корреляционных зависимостей.

Исходными данными для анализа послужили материалы систематических наблюдений Гидромета (за шесть лет) выше и ниже промышленных центров. В целом, использовался набор данных,

которые в различной степени отражают состояние и качество поверхностных вод: БПК<sub>5</sub>, общая минерализация, температура воды, содержание растворенного кислорода, азот аммонийный, нефтепродукты.

При анализе гидрохимических данных временные изменения концентрации компонентов химического состава не учитывались, так как предполагалось, что пространственная изменчивость превышает их. Выбор признаков, характеризующих химический состав вод, а также точек опробования, определялся задачей исследования и объемом имеющегося материала. Основными характеристиками, помогающими оценить пригодность факторной модели для описания исходной матрицы данных, являются коэффициенты множественной корреляции.

Анализ этой информации показывает, что на участках с выраженным антропогенным загрязнением отмечаются повышенные значения минерализации воды, концентрации нефтепродуктов и фенола. Также на участках со значительным антропогенным влиянием обнаруживается связь между БПК<sub>5</sub> и содержанием хлоридов, БПК<sub>5</sub> и фосфатами, азота аммонийного и СПАВ. Характерная зависимость между фосфатами и БПК<sub>5</sub> показана на рисунке 1. В процессе анализа выявлено, что содержание фенола хорошо коррелирует с концентрацией нефтепродуктов и хлоридов при незначительной антропогенной нагрузке на качество природных вод.

Наиболее тесная связь (коэффициент корреляции  $r$  варьирует от 0,5 до 0,97) отмечена в следующих соотношениях:

БПК <sub>5</sub> и азотом нитратным	$r = 0,56...0,7$
БПК <sub>5</sub> и азотом аммонийным	$r = 0,52...0,8$
БПК <sub>5</sub> и фосфатами	$r = 0,52...0,8$
БПК <sub>5</sub> и хлоридами	$r = 0,54...0,73$
фосфатами и азотом нитратным	$r = 0,5 ... 0,75$
фосфатами и азотом нитритным	$r = 0,5 ... 0,75$
фосфатами и азотом аммонийным	$r = 0,54...0,95$
фосфатами и нефтепродуктами	$r = 0,53...0,97$

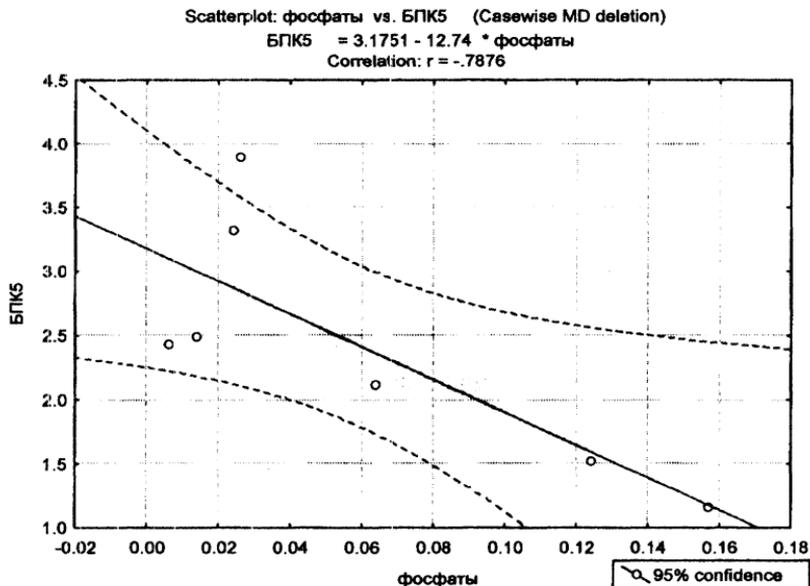


Рисунок 1 – Взаимосвязь между фосфатами и БПК

Существенной значимой связи между БПК<sub>5</sub> и СПАВ, БПК<sub>5</sub> и фенолами не обнаружено (коэффициент корреляции не превышает 0,3).

Уравнения регрессии могут применяться при отсутствии определения компонента для расчета концентрации его по содержанию другого компонента. Здесь необходимо учитывать средний процент расхождения между результатами, полученными расчетным путем и химическим анализом (спектрофотометрией, ИК-спектрофотометрией, флюорисцентным методом, ААС и т.д.), т.е. необходимо учитывать относительную погрешность. Использовать данные, полученные с помощью уравнений целесообразно в двух случаях:

- когда относительная погрешность допустима для целей расчета;
- когда данные прошли предварительный этап проверки на попадание в диапазон экстремальных значений.

Установленные зависимости между отдельными гидрохимическими показателями могут быть использованы в алгоритмах контроля гидрохимической информации.

Из других дополнительных способов контроля предлагается использовать следующие проверки:

- сравнение отдельных показателей между собой, полученных в рамках одного отбора проб;
- сравнение отдельных показателей между собой в контексте пространственно-временной изменчивости;
- сравнение полученных результатов с нормативными показателями, т.е. с предельно-допустимой концентрацией (ПДК) в водном объекте или допустимой концентрацией (ДК) на выпуске предприятия;
- сравнение результатов измерения с ретроспективной информацией для идентификации резко выделяющихся наблюдений, которые маркируются для дальнейшего анализа и др.
- анализ гидрохимического баланса участка реки (между точками отбора проб выше и ниже выпуска сточных вод).

Предлагаемые методы контроля наиболее эффективны при их совместном использовании, что можно осуществить в автоматизированных информационных системах. В настоящее время работы по автоматизации контроля данных уже начаты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по контролю данных гидрохимических анализов сточных и поверхностных вод. Минск, – 2003. Регистрационный номер: 0212.3 – 2003.
2. Методические указания по организации Госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод: МУ 2.1.5.800-99.М., Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава РФ, – 2000.
3. Молоков, М.В., Шифрин, В.Н. Очистка поверхностного стока с территорий городов и промышленных площадок. М. Стройиздат, – 1977.

И.В. Карпенчук, В.Н. Короткий (БНТУ)

## МЕХАНИКА НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЫЛЕГАЗОВОГО ПОТОКА В ПОРОВОЙ ТРУБКЕ ЗЕРНИСТОГО ФИЛЬТРА

При расчете и проектировании зернистых фильтров для очистки промышленных газовых выбросов, содержащих твердые частицы пыли, важно определять аэродинамические параметры фильтров в процессе очистки. С этой целью получены уравнения, описывающие осредненное одномерное движение пылегазовой смеси в канале поровой трубки переменного сечения.

С учетом того, что осаждение пыли происходит в насыпных слоях, поровая трубка принимается в виде расширяющегося канала круглого сечения. Выберем систему координат с началом в точке схождения угла конусности. Обозначим угол конусности через  $\alpha$ .

Обозначим сечение поровой трубки плоскостью  $x=a$  через  $w_x$ . Как известно, пылесодержание можно выразить

$$m(x_0, t_0) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} m'(x_0, t_0) dt, \quad (1)$$

где  $m'(x_0, t_0)$  – доля площади поровой трубки занятой твердой фракцией в момент времени  $t$ ;  $\Delta t \gg 1/n$ , где  $n$  – частота прохождения твердых частиц через сечение  $w_{x_0}$ .

В дальнейшем примем следующие обозначения осредненных по времени и сечениям  $w_x$  величин:

$\tau$  – касательные напряжения на стенке поровой трубки;  $\sigma$  – нормальные напряжения на стенке поровой трубки;  $p$  – давление в нормальных сечениях оси  $Ox$ ;  $\rho_1, \rho_2$  – соответственно плотности газа и частиц пыли;  $v_1, v_2$  – соответственно скорости газа и частиц пыли.

Определим проекции на ось  $Ox$  сил, действующих на элементарный участок поровой трубки, заключенный между сечениями  $w_x$  и  $w_{x+\Delta x}$ .

Массовые силы:

$$G = g_x \iiint_V [(1-m)\rho_1 + m\rho_2] dV =$$

$$= g_x \int_x^{x+\Delta x} dn \int_{w_n} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] dydz,$$

где  $g_x$  – проекция ускорения свободного падения на ось  $0x$ ;  $V$  – объем между сечениями  $x$  и  $x+\Delta x$ ;  $n$  – координата промежуточного сечения между сечениями  $x$  и  $x+\Delta x$ .

$$G = g_x \left\{ \int_x^{x+\Delta x} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] w_n dn \right\} =$$

$$= g_x \left\{ \int_x^{x+\Delta x} \pi t g^2 \frac{\alpha}{2} n^2 [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] dn \right\}. \quad (2)$$

Проекция сил трения на ось  $0x$  равна:

$$\vec{T} = \iint_{w_{бок}} \vec{\tau} dw = \int_x^{x+\Delta x} \tau \frac{dn}{\cos \frac{\alpha}{2}} \int_r \vec{e}_\tau dl,$$

где  $w_{бок}$  – боковая поверхность усеченного конуса между сечениями  $w_x$  и  $w_{x+\Delta x}$ ;  $e_\tau$  – вектор единой длины, сонаправленный с  $\tau$ ;  $l$  – длина окружности радиуса  $r=n \cdot tg\alpha/2$ ;

$$\int_r \vec{e}_\tau dl = -2\pi \vec{e}_0 n \cos \frac{\alpha}{2} tg \frac{\alpha}{2},$$

где  $e_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  – единичный вектор, сонаправленный с осью  $0x$ .

Тогда в проекции на ось  $0x$  имеем

$$T = - \int_x^{x+\Delta x} 2\pi t g \frac{\alpha}{2} n \tau dn. \quad (3)$$

При определении сил реакции стенок имеем:  $\vec{N} = \iint_{\sigma_{\text{бок}}} d\vec{w}$ .

В проекции на ось  $Ox$  аналогично, как и в случае определения сил трения получим:

$$N = \int_x^{x+\Delta x} 2\pi r g^2 \frac{\alpha}{2} n \sigma dn. \quad (4)$$

Определяем силы давления, действующие на площади живых сечений поровой трубки  $w_x$  и  $w_{x+\Delta x}$ , ограничивающие участок  $\Delta x$ :

$$\begin{aligned} P &= p(x, t)w_x - p(x + \Delta x, t)w_{x+\Delta x} = \\ &= -w_{x+\Delta x}[p(x + \Delta x, t) - p(x, t)] + p(x, t)(w_x - w_{x+\Delta x}), \quad (5) \\ P &= -\pi r g^2 \frac{\alpha}{2} \left[ (x + \Delta x)^2 \int_x^{x+\Delta x} \frac{\partial p}{\partial x} dn + p(2x\Delta x + \Delta x^2) \right]. \end{aligned}$$

Осредненную по сечению скорость можно записать следующим образом [1]:

$$\bar{v} = \frac{1}{\Delta t \sum_i w_i} \int (\sum_i v_i dw_i) dt, \quad \Delta t \gg 1/n, \quad (6)$$

где  $n$  – средняя частота прохождения отдельных образований данного компонента через сечение.

Для элементарного участка поровой трубки, заключенного между сечениями  $w_x$  и  $w_{x+\Delta x}$  (то есть  $\Delta x \ll 1$ , при этом заменяем  $\Delta x$  на  $dx$ ), запишем закон изменения импульса. Используя предыдущие соотношения (2, 3, 4, 5) и учитывая, что для непрерывной функции (с точностью до членов 2-го порядка малости)

$$\int_x^{x+\Delta x} f(n) dx \approx f(x) dx$$

Пренебрегая членами порядка малости больше единицы, запишем:

$$\begin{aligned}
G - T + N + P &= (w_1 + dw_1)(v_1 + dv_1) + \\
&+ (w_2 + dw_2)(v_2 + dv_2) - w_1 v_1 - w_2 v_2. \\
g_x \pi t g^2 \frac{\alpha}{2} x^2 [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] dx - 2\pi t g \frac{\alpha}{2} x \tau dx + & \quad (7) \\
+ 2\pi t g^2 \frac{\alpha}{2} x \sigma dx - \pi t g^2 \frac{\alpha}{2} (x^2 \frac{\partial p}{\partial x} dx + 2x p dx) = & \\
= (w_1 - dw_1)(v_1 + dv_1) + (w_2 + dw_2)(v_2 + dv_2) - w_1 v_1 - w_2 v_2, &
\end{aligned}$$

где  $w_1$  и  $w_2$  — соответственно массовые расходы газообразной и пылевой фазы.

В правой части уравнения записано изменение импульса от сечения  $w_x$  до  $w_{x+\Delta x}$ . Используя соотношения

$$\begin{aligned}
dw_i &= \pi t g^2 \frac{\alpha}{2} \left\{ -x \frac{2\partial(m\rho_i)}{\partial t} dx + \frac{\partial}{\partial x} [(1-m)\rho_i v_i x^2] dx \right\}, \\
\frac{dv_i}{dx} &= \frac{1}{v_i} \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x}, \\
d(w_1 + w_2) &= 0 \quad (\text{постоянство массового расхода}).
\end{aligned}$$

Пренебрегая величинами 2-го 3-го порядка малости, получим

$$\begin{aligned}
g_x [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] + \frac{2\sigma}{x} - \frac{2\tau}{x t g \frac{\alpha}{2}} - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2p}{x} = & \\
= m\rho_2 \left( \frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + (1-m)\rho_1 \left( \frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + & \quad (8) \\
+ (v_1 - v_2) \left\{ -\frac{\partial(m\rho_1)}{\partial t} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} [(1-m)\rho_1 x^2 v_1] \right\} &
\end{aligned}$$

К полученному уравнению добавим уравнение неразрывности, которое в данном случае имеет вид

$$\pi t g^2 \frac{\alpha}{2} \left\{ x^2 \frac{\partial}{\partial t} [\rho_2 m + (1-m)\rho_1] + \frac{\partial}{\partial x} [x^2 \rho_2 m v_2 + x^2 \rho_1 (1-m)v_1] \right\} = 0. \quad (9)$$

В случае установившегося движения

$$\left\{ g_x [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] + \frac{2\sigma}{x} - \frac{2\tau}{x t g \frac{\alpha}{2}} - \frac{dp}{dx} - \frac{2p}{x} = \right. \quad (10)$$

$$\left. = m \rho_2 v_2 \frac{dv_2}{dx} + (1-m)\rho_1 v_1 \frac{dv_1}{dx} + (v_1 - v_2) \frac{1}{x^2} \frac{d}{dx} [(1-m)\rho_1 v_1 x^2], \right.$$

$$\pi t g^2 \frac{\alpha}{2} [\rho_2 m v_2 + \rho_1 (1-m)v_1] x^2 = const. \quad (11)$$

В результате получена незамкнутая система двух уравнений с восьмью неизвестными ( $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $p$ ,  $m$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ). Причем  $\rho_1$  и  $\rho_2$  могут быть определены, если известны температура и состав газа и пыли.

В рассматриваемой математической модели будем считать, что средняя ось расположения поровой трубки горизонтальна и удельная энергия напряжения в рассматриваемых сечениях много меньше удельной энергии давления и удельной кинетической энергии, тогда можно принять  $g_x = 0$ .

В экспериментах давление изменялось незначительным, следовательно, можно принять, что  $\rho_1 = const$ . Так как размеры частиц пыли достаточно малы, можно принять, что величины  $v_1$  и  $v_2$ ,  $dv_1/dx$  и  $dv_2/dx$  одного порядка. С учетом сделанных допущений уравнения (10, 11) примут вид

$$\frac{2\sigma}{x} - \frac{2\tau}{x t g \frac{\alpha}{2}} - \frac{dp}{dx} - \frac{2p}{x} = v \frac{dv}{dx} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1], \quad (12)$$

$$\pi \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] \nu x^2 = q, \quad (13)$$

где  $q$  – исходный массовый расход пылегазовой смеси.

Принимаем распределение давления в сечении по аналогии с пограничным слоем. В уравнениях Прандтля слагаемое  $1/\rho \cdot (\partial p / \partial x)$  часто записывается в виде  $1/\rho \cdot (dp/dx)$ . Этим подчеркивается, что давление зависит только от одной переменной  $x$ , то есть можно считать, что изменение давления по нормали к стенке не происходит. Тогда нормальные напряжения на стенке равны значению давления в сечении, уравнение (12) примет вид:

$$-\frac{2\tau}{x \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} - \frac{dP}{dx} = \nu \frac{d\nu}{dx} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1], \quad (14)$$

откуда 
$$\tau = -\frac{1}{2} \left\{ \frac{dP}{dx} + \nu \frac{d\nu}{dx} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1] \right\} x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (15)$$

В виду малости угла расширения поровой трубки, пренебрегаем потерями на расширение и считаем, что энергия давления в перпендикулярных сечениях расходуется на преодоление сил трения. Тогда используя соотношения (3) и (5), получим

$$\tau = \frac{x \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{2} \frac{dp}{dx} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} p. \quad (16)$$

С учетом этого из (14) и (16) получим:

$$\frac{dp}{dx} + \frac{p}{x} = -\frac{1}{2} \nu \frac{d\nu}{dx} [(\rho_2 - \rho_1)m + \rho_1]. \quad (17)$$

Два уравнения (13) и (17) связывают два неизвестных  $\nu$ ,  $m$ ,  $p$ . Знаясь или определяя пылесодержание  $m$  можно определить ос-

новые аэродинамические параметры: скорость газового потока в любом сечении и на выходе из фильтра, а так же давления в расчетных сечениях и потери давления при движении газового потока через фильтр.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе, С.С., Стырикович, М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

УДК 532.528

И.В. Карпенчук (БНТУ)

### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАВИТАЦИОННЫХ ЭЖЕКТОРОВ-СМЕСИТЕЛЕЙ**

Наряду с решением вопросов защиты элементов гидромашин и аппаратов от кавитационного воздействия в промышленности для интенсификации технологических процессов, протекающих в системах жидкость-жидкость, жидкость-газ, жидкость-твердое тело, применяются установки, в которых определяющим фактором воздействия является кавитация. К ним относятся различного рода диспергаторы, эмульгирующие устройства, смесители для создания эмульсий, растворов и дисперсных систем. Возникновение и развитие гидродинамической кавитации в потоке жидкости происходит обычно в струйных эжекторах, выполненных по типу трубки Вентури, которые и служат основным кавитирующим элементом в эмульгаторах, диспергаторах и смесителях использующих кавитацию.

При разработке кавитационных эжекторов-смесителей, работающих в гидравлических системах при статических противодавлениях необходимо наряду с заданными гидродинамическими параметрами течения рабочей жидкости в системе, находить оптимальные геометрические характеристики струйного кавитатора,

выполненного по типу трубки Вентури, определяющие возникновение и развитие в нем кавитационного режима.

Основными характеристиками, определяющими работу устройств типа трубки Вентури, служат следующие параметры:  $Q$  – расход жидкости;  $p_1$  – давление на входе в эжектор-смеситель;  $p_2$  – противодействие на выходе из эжектора смесителя;  $\alpha_k$  – угол конусности конфузора;  $\alpha_d$  – угол конусности диффузора;  $S_c$  – площадь сжатого (узкого) сечения эжектора-смесителя;  $S$  – площадь входного и выходного сечения. Зная эти параметры можно решить вопрос о наличии и степени развития кавитации. Как известно, кавитация будет иметь место, если выполняется неравенство [1]

$$\sigma \leq \sigma_k, \quad (1)$$

где  $\sigma$ ,  $\sigma_k$  – число кавитации и критическое число кавитации, отнесенные к скорости в выходном сечении эжектора-смесителя

$$\sigma = \frac{2(p_1 - p_{н.п.})}{\rho v^2}, \quad (2)$$

где  $p_{н.п.}$  – давление насыщенных паров рабочей жидкости (в дальнейших расчетах ввиду его малости по сравнению с  $p_1$  его можно не учитывать).

При возникновении и развитии кавитации сопротивление эжектора-смесителя резко возрастает. Следовательно, оптимальными параметрами будут такие, которые обеспечивают возникновение кавитации при минимальных потерях давления, т.е.

$$\sigma = \sigma_k \text{ или } \zeta = \beta \sigma_k, \quad (3)$$

где  $\beta = 1 - \frac{p_2}{p_1}$  – параметр, зависящий от противодействия и связывающий коэффициент гидродинамического сопротивления  $\zeta = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho v^2}$  и критическое число кавитации, соответствующее

моменту возникновения кавитации, отнесенные к скорости в выходном сечении [2].

Для нахождения искомым критических чисел кавитации использовалась ранее полученная формула, отнесенная к скорости в выходном сечении устройства [3].

$$\sigma_k = \frac{4,54}{mn^{2,5}\zeta^{0,4}}, \quad (4)$$

где  $m = \frac{\alpha_k}{\alpha_d}$ ;  $n = \frac{S_c}{S}$  - степень сужения эжектора-смесителя. Коэффициент гидродинамического сопротивления в момент возникновения кавитации принимался равным, коэффициенту сопротивления в квадратичной области  $\zeta = \zeta_{кв}$ , который определялся, как сумма коэффициентов гидродинамического сопротивления конфузора и диффузора [4], без учета интерференции местных сопротивлений, в виду того, что коэффициент интерференции не превышал 6% [4].

$$\zeta_{ке} = k_{конф} \frac{1}{n^2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2}\right)^2 + \sin \alpha_d \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1-n}$ ,  $k_{конф}$  - эмпирический справочный коэффициент, зависящий от угла конусности [4].

Ставится задача отыскания таких значений  $n$  и  $\alpha_d$  при заданных параметрах значения жидкости  $Q$ ,  $p_1$ ,  $p_2$  и геометрической характеристики, зависящей от диаметра подводящего трубопровода  $S$  при различных углах конусности  $\alpha_k$ , чтобы можно было гарантировать возникновение кавитации в эжекторе-смесителе. Практический интерес представляет отыскание таких углов диффузора на отрезке от 0 до  $20^\circ$ .

Предлагается численное решение данной задачи. В силу (3) для выполнения (1) достаточно так определить степень сужения  $n$  и угла конусности диффузора  $\alpha_d$ , чтобы

$$\zeta_{ке} = \beta \sigma_{к} \quad (6)$$

Анализ формул (4) и (5) показывает, что существует такая функция  $\alpha_{д} = f(n)$ ,  $0 < n < 1$ , что при любом  $n \in (0,1)$  и  $\alpha_{д} = f(n)$  равенство (6) будет выполнено. Подставляем в (4) и (5) при каждом  $n$  вместо  $\alpha_{д}$  вместо  $f(n)$  можно получить графическую зависимость  $\sigma_{к} = \varphi(n)$ .

Вычисления проводятся по следующей схеме. Фиксируется значение угла конусности конфузора  $\alpha_{к}$  ( $\alpha_{к} = 10, 20, 25, 40^\circ$ ). Затем для каждого из значений  $\beta = 0,1, 0,2, \dots, 0,7$  организуется цикл по  $n$ , которое изменяется от 0,01 до 0,9 с шагом 0,01. Каждый шаг этого цикла включает в себя нахождение методом половинного деления угла конусности диффузора  $\alpha_{д}$ , как корня уравнения (6) с точностью до  $2^{-8}$  градуса и вычисления соответствующего значения  $\sigma_{к}$ . После компьютерных вычислений получены графические зависимости  $\alpha_{к} = f(n)$ , выполненные на одноосной логарифмической клетчатке, представленные на рисунках 1 – 4.

Используя полученные зависимости, расчет оптимальных параметров производится следующим образом.

Для заданных параметров  $Q, p_1, p_2$ , вычисляем  $\beta, \sigma_{к}$  и  $l_{г}\sigma_{к}$ . По графикам (рисунков 1 – 4) определяем степень сужения эжектора-смесителя  $n$ , которому соответствует значение  $\sigma_{к} = \sigma$ . Тогда, в силу (4) и (6)

$$\alpha_{д} = \frac{\alpha_{к} n^{2,5} \beta^{0,4} \sigma_{к}^{1,4}}{4,54} \quad (7)$$

Найденные параметры  $n$  и  $\alpha_{д}$  эжектора-смесителя обеспечивают возникновение в нем кавитации при минимально возможных потерях давления.

При необходимости получения в эжекторе-смесителе более развитого кавитационного режима, задаемся критическим числом кавитации  $\sigma_{к} > \sigma_{к}$  и по графикам рисунки 1 – 4, и формуле (7) определяем необходимые геометрические размеры эжектора-смесителя. При необходимости обеспечения бескавитационной работы полагают  $\sigma_{к} < \sigma_{к}$  и расчет повторяют.

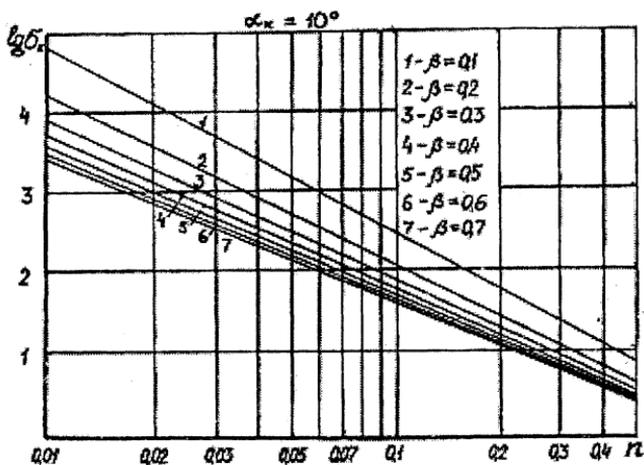


Рисунок 1 – Зависимости для расчета оптимальных параметров эжектора-смесителя при  $\alpha_k=10^\circ$

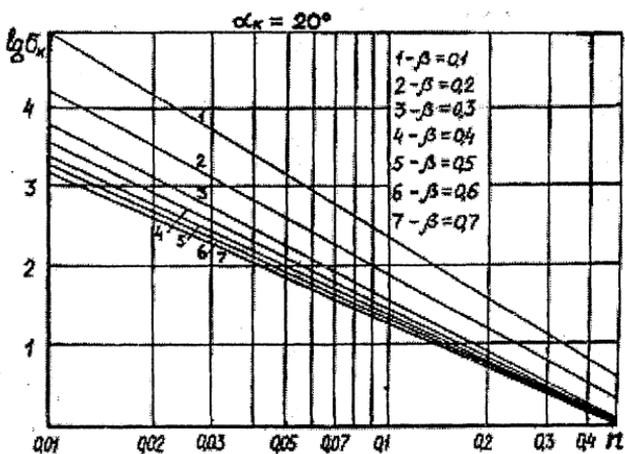


Рисунок 2 – Зависимости для расчета оптимальных параметров эжектора-смесителя при  $\alpha_k=20^\circ$

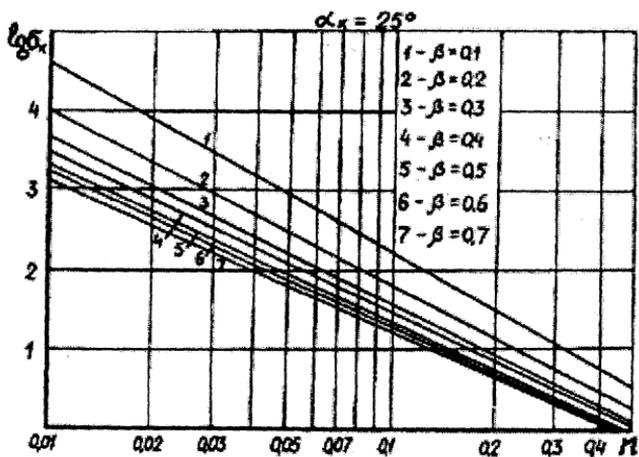


Рисунок 3 – Зависимости для расчета оптимальных параметров эжектора-смесителя при  $\alpha_k = 25^\circ$

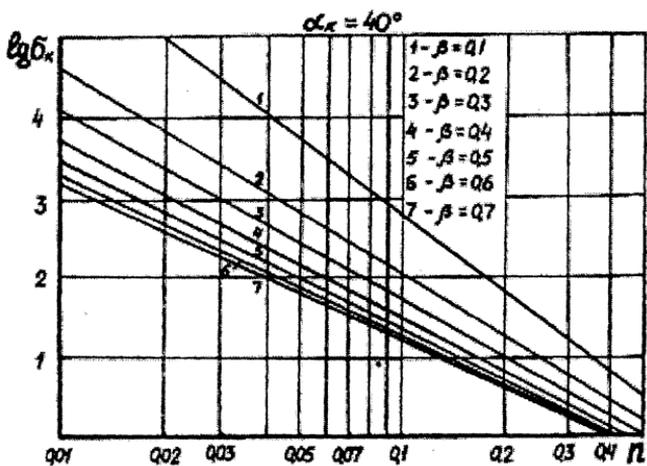


Рисунок 4 – Зависимости для расчета оптимальных параметров эжектора-смесителя при  $\alpha_k = 40^\circ$

Представленная методика расчета позволяет определять оптимальные параметры кавитационных эжекторов-смесителей, обеспе-

чивая как эффективное эмульгирование, растворение и диспергирование при минимальных потерях давления, так и бескавитационную работу струйных эжекторов при необходимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин, В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машиностроение, 1975. – 380 с.
2. Арзуманов, Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 308с.
3. Карпенчук И.В., Козлов Д.А. Особенности гидравлического расчета систем, включающих устройства, работающие в кавитационном режиме // Изв. вузов СССР-Энергетика – 1983 – № 7. – С. 106-111.
4. Рабинович, Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980 – 276 с.

УДК 628.543

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси)

### **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУЛЬСАЦИОННЫХ БИОРЕАКТОРОВ НА ОБЪЕМНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПЕРЕДАЧИ**

Одним из важнейших вопросов в решении проблемы перестройки и совершенствования водохозяйственной деятельности молочной промышленности является изыскание наиболее эффективных методов очистки сточных вод, рациональных конструкторских и технологических приемов, обеспечивающих увеличение мощности очистных сооружений, повышение эффективности их работы и качества очищенной воды.

Аэробная биологическая очистка является наиболее эффективным и надежным в санитарном отношении методом очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий [1]. Анализируя факторы, влияющие на процесс биологической очистки, в [2] был сделан вывод о том, что константа скорости окисления полностью определяется интенсивностью массопередачи и концентрацией субстрата  $L_0$  в начальный момент времени. Интенсифицировать массо-

передачу, а следовательно, и процесс биологической очистки можно при помощи пульсационного биореактора [3].

Изучением массообмена в системе газ - жидкость занимались Городецкий И.Я., Васин А.А., Кафаров В.В., Аэров М.Э., Меньшиков В.А., Трайкина С.С., Винтер А.А., Багачева Э.С., Марченко Ю.Г. и др. Не смотря на это данные по массопередаче в аппаратах предусматривающих воздействие низкочастотных колебаний на систему газ-жидкость очень малочисленны.

Основной задачей выполненных исследований являлось определение конструктивных параметров пульсационного биореактора при которых будет наблюдаться максимальное значение объемного коэффициента массопередачи.

Анализируя информацию, изложенную в [4-9], можно выделить четыре основных параметра, характеризующих работу пульсационного биореактора:  $n$  – частота колебания насадки,  $s$  – амплитуда колебания,  $\Delta$  – расстояние между дисками насадки,  $F_n$  – полезная площадь дисков насадки.

Исследования, приведенные в [7] показали, что с увеличением частоты колебания насадки возрастает и объемный коэффициент массопередачи. Однако при биологической очистке высокая частота колебания насадки биореактора будет усложнять процессы иммобилизации микроорганизмов на дисках насадки и седиментации избыточной биомассы во вторичном отстойнике, что неблагоприятно будет отражаться на ходе самого процесса очистки. Согласно [10] частота колебаний насадки до 1,3 Гц не влияет на иммобилизационные и седиментационные свойства биомассы, поэтому электропривод пульсационного биореактора подбирали с учетом того, что частота колебания насадки не будет превышать максимального значения 1,3 Гц.

Увеличение расстояния между дисками приводит к падению объемного коэффициента массопередачи [7], поэтому между дисками насадки необходимо устанавливать минимально возможное расстояние. Для того чтобы в процессе биологической очистки исключить зарастание междискового пространства между дисками были установлены муфты шириной 12 мм.

Таким образом, с целью изучения массообменных характеристик пульсационного биореактора была предложена следующая зависимость:

$$\beta_{об} = f(s, F_n), \quad (1)$$

где  $s$  – амплитуда колебания насадки, мм;

$F_n$  – полезная площадь дисков насадки,  $m^2$ .

Для определения оптимального режима работы пульсационного биореактора, при котором будет наблюдаться максимальное значение объемного коэффициента массопередачи, была собрана лабораторная установка, изображенная на рисунке 1. Установка состояла из модели пульсационного биореактора с рабочим объемом  $0,031 m^3$ , бака для сбора воды емкостью  $1,12 m^3$ , расходного бака емкостью  $0,75 m^3$ , открытого воздухоотделителя емкостью  $0,013 m^3$ , насоса К - 45/55 для поддержания постоянного уровня в расходном баке, компрессора УК – 1М для подачи воздуха в пульсационный биореактор и контрольно-измерительных приборов.

Насадка биореактора состояла из набора перфорированных дисков, изготовленных из винипласта, диаметром 200 мм, толщиной 6 мм. Площадь перфорации – 3,84 % площади диска. Возвратно-поступательные колебания частотой 1,3 Гц дисковой насадке биореактора сообщались через кривошипно-шатунный механизм при помощи электропривода (электродвигателя комбинированного с редуктором) ZG2KMRB71K4.

Величину объемного коэффициента массопередачи определяли в соответствии с методикой, приведенной в [4,9], по балансу растворенного кислорода в воде, поступающей в биореактор и выходящей из него.

По средним значениям концентраций растворенного кислорода в воде, поступающей в биореактор  $C_1$ , и в воде выходящей из биореактора  $C_2$ , определяли число единиц переноса  $N_{ож}$ :

$$N_{ож} = \ln \frac{c^* - c_1}{c^* - c_2}, \quad (2)$$

где  $C^*$  – равновесная концентрация кислорода в воде при данной температуре при нормальном давлении воздуха, мг/л.

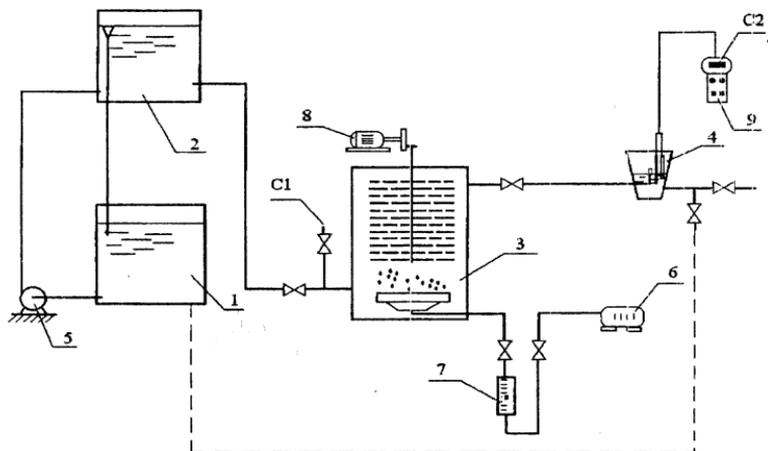


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по определению объемного коэффициента массопередачи.

1 – бак для сбора воды, 2 – расходный бак, 3 – пульсационный биореактор, 4 – открытый воздухоотделитель, 5 – насос, 6 – компрессор, 7 – ротаметр, 8 – электропривод, 9 – кислородомер

Средняя движущая сила процесса массопередачи:

$$\Delta c_{cp} = \frac{c_2 - c_1}{N_{ож}} \quad (3)$$

Высота единицы переноса (ВЕП)

$$h_{ож} = \frac{H}{N_{ож}}, \quad (4)$$

где  $H$  – высота аэрируемого столба жидкости, м.

Объемный коэффициент массопередачи  $\beta_{об}$ , ч<sup>-1</sup>:

$$\beta_{об} = \frac{v_{жс}}{h_{ожс}}, \quad (5)$$

где  $v_{ж}$  – приведенная скорость движения жидкости в биореакторе, м/час, определяемая

$$v_{жс} = \frac{Q}{F}, \quad (6)$$

где  $Q$  – расход жидкости, м<sup>3</sup>/час;  $F$  – площадь поперечного сечения аппарата, м<sup>2</sup>.

С целью сокращения затрат времени и материальных средств на выполнение лабораторных исследований был применен математический метод оптимального планирования эксперимента, позволивший получить математическую (экспериментально-статистическую) модель процесса массопередачи в пульсационном биореакторе.

Под математическим описанием процесса понимается система уравнений, связывающих функцию отклика (величину, качественно характеризующую протекание процесса) с влияющими факторами. Ценность математического описания заключается в том, что оно, во-первых, дает информацию о влиянии факторов, во-вторых, позволяет количественно определить значения функции отклика при любом заданном режиме ведения процесса [11].

Процесс нахождения математической модели включал: планирование эксперимента, проведение эксперимента на объекте исследований; проверку воспроизводимости эксперимента; получение математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии; проверку математической адекватности описания.

Для нахождения области оптимума был произведен экспериментальный поиск и затем в оптимальной области осуществлен ротатбельный план второго порядка, при котором факторы варьировались на 5 уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных +1; -1; +1,41; -1,41; 0 (ротатбельное центральное композиционное планирование - ЦКП) [11]. На основании априорной информации было установлено, что на эффективность иссле-

дваемого процесса наибольшее влияние оказывают два фактора. Поэтому математическое описание процесса выражается в виде уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

Опыты выполняли в следующей последовательности. В бак (1), заполненный водопроводной водой, добавляли сульфит натрия и хлорид кобальта, предварительно растворенные в теплой воде. Количество добавляемого сульфита натрия определяли исходя из остаточной концентрации растворенного кислорода, не более 1,5 мг/л. Количество хлорида кобальта, играющего роль катализатора в реакции окисления сульфита натрия растворенным кислородом, определяли из расчета г/м<sup>3</sup>.

После добавления реагентов включили насос (5) на перемешивание, продолжительность перемешивания 1,5 – 2 минуты. Объемным способом установили требуемый расход  $Q = 0,0283$  л/с = 0,102 м<sup>3</sup>/ч, что соответствовало скорости жидкости 1,921 м/ч =  $0,53 \cdot 10^{-3}$  м/с. Установлено, что в интервале линейных скоростей жидкости  $10^{-4} - 10^{-3}$  м/с, имеющих практическое значение для промышленных реакторов, скорость жидкости не влияет на объемный коэффициент массопередачи [7].

Включили подачу воздуха с установленным расходом, расход воздуха определили при помощи ротаметра РС - 5 (7). На протяжении всего эксперимента подача воздуха была неизменной и составляла  $Q_{\text{возд}} = 0,58$  л/с.

Затем после 10-минутной работы аппарата с интервалом в 3 минуты фиксировали значение концентрации растворенного кислорода  $C_2$  в воде, в воздухоотделителе (4), который в технологической схеме установлен после биореактора. Значение концентрации растворенного кислорода в воде, поступающей в биореактор,  $C_1$  оставалось на протяжении всего эксперимента неизменным,  $C_1 = 0,05$  мг/л. Температуру и концентрацию растворенного кислорода в воде определяли при помощи портативного кислородомера АЖА – 101М (9).

Для вывода уравнения связи функции отклика  $y$  (объемный коэффициент массопередачи -  $\beta_{\text{об}}$ ) и независимых входных переменных – факторов  $X_1$  (амплитуда колебания насадки -  $s$ , мм),  $X_2$  (по-

лезная площадь насадки –  $F_n, \text{ м}^2$ ) был применен статистический метод планирования эксперимента по ротатбельному плану полного факторного эксперимента второго порядка.

Для проведения полного факторного эксперимента задавались условиями, приведенными в таблице 1.

Амплитуду колебания насадки пульсационного биореактора изменяли за счет изменения диаметра маховика электропривода, площадь насадки аппарата варьировали, изменяя количество дисков насадки.

Таблица 1 – Условия проведения эксперимента

Характеристика	Амплитуда колебания насадки, мм	Площадь насадки, $\text{м}^2$
Основной уровень	67	0,604
Интервал варьирования	23,4	0,214
Верхний уровень	90,4	0,818
Нижний уровень	43,6	0,390

Перед реализацией плана на объекте варианты варьирования факторов рандомизировались, то есть с помощью таблицы равномерно распределенных случайных чисел определяли последовательность реализации опытов в каждой точке и варианты варьирования факторов. В таблице 2 представлены экспериментальные данные, полученные на основании выполненных в лабораторных условиях исследований.

В таблице 2 приведены “уровни” переменных в каждой серии опытов и экспериментальные значения функции отклика (объемного коэффициента массопередачи), определенные в каждой серии опытов.

В результате статистической обработки экспериментальных данных составлены уравнения регрессии в виде полиномов второй степени в кодированных (8) и физических (9) переменных:

$$y = 13,165 - 0,403X_1 + 1,436X_2 + 0,179X_1 \cdot X_2 - 0,996X_1^2 - 0,177X_2^2, (8)$$

$$\beta_{об} = 2,154 + 0,206s + 8,986F_n + 0,036s \cdot F_n - 0,00184s^2 - 3,865F_n^2. \quad (9)$$

Таблица 2 – Результаты эксперимента, выполненного по матрице ротatableльного ЦКП

Система опытов	№ опыта	Амплитуда колебания насадки (s), мм	Полезная площадь насадки ( $F_n$ ), м <sup>2</sup>	Объемный коэффициент массопередачи ( $\beta_{об}$ ), ч <sup>-1</sup>				$\bar{y}_p$ , ч <sup>-1</sup>
				$y_1^3$	$y_2^3$	$y_3^3$	$\bar{y}_3$	
Полный факторный эксперимент	1	43,6	0,390	11,22	11,10	11,13	11,15	11,140
	2	90,4	0,390	10,11	9,98	10,15	10,08	9,970
	3	43,6	0,818	13,58	13,52	13,43	13,51	13,650
	4	90,4	0,818	13,18	13,15	13,12	13,15	13,200
Опыты в звездных точках	5	100	0,604	10,43	10,45	10,35	10,41	10,610
	6	34	0,604	11,63	11,66	11,72	11,67	11,740
	7	67	0,906	14,74	14,76	14,87	14,79	14,840
	8	67	0,302	10,48	10,58	10,50	10,52	10,790
Опыты в центре плана	9	67	0,604	13,25	13,16	13,22	13,21	13,165
	10	67	0,604	13,14	13,06	13,19	13,13	13,165
	11	67	0,604	13,36	13,26	13,34	13,32	13,165
	12	67	0,604	13,14	13,24	13,16	13,18	13,165
	13	67	0,604	12,84	13,12	12,92	12,69	13,165

Условие значимости выполняется для всех коэффициентов, расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 2,99$  меньше табличного значения  $F_{табл} = 6,59$  [11], следовательно, уравнения регрессии (8), (9) адекватно описывают поверхность отклика.

Из графика, приведенного на рисунке 2, видно, что при любом значении площади насадки с ростом амплитуды колебания до  $s=70,6$  мм увеличивается и значение объемного коэффициента массопередачи, при дальнейшем увеличении амплитуды происходит его снижение. Исследования же влияния частоты и амплитуды колебания насадки [7, 12] показывают, что с увеличением обеих па-

раметров объемный коэффициент массопередачи возрастает, что, по мнению авторов, связано с дроблением пузырьков при движении насадки. Это противоречие объясняется тем, что в экспериментах, проводимых авторами [7, 12], рассматривались небольшие значения амплитуды колебания. В нашем же случае частота колебания - величина постоянная и, вполне возможно, что при значительном увеличении амплитуды колебания насадки происходит увеличение коалесцентной способности пузырьков воздуха, что способствует снижению коэффициента массопередачи биореактора.

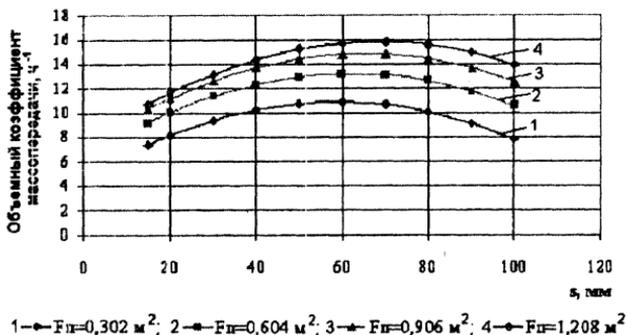


Рисунок 2 – Зависимость объемного коэффициента массопередачи от амплитуды колебания насадки биореактора

Анализируя данные, приведенные на рисунке 3, установили, что значение объемного коэффициента массопередачи увеличивается с ростом полезной площади насадки до 1,5 м<sup>2</sup>, после чего, при дальнейшем увеличении площади происходит его снижение.

Таким образом, в ходе проведения эксперимента по изучению массообменных характеристик пульсационного биореактора было подтверждено, что значение объемного коэффициента массопередачи пульсационного биореактора зависит от его конструктивных параметров. На основании выполненных в лабораторных условиях экспериментальных исследований по оценке массообменных характеристик пульсационного биореактора была получена экспериментально-статистическая модель, иллюстрирующая зависимость объемного коэффициента массопередачи от амплитуды колебания и полезной площади насадки. Также было установлено, что увеличе-

ние объемного коэффициента массопередачи связано с ростом амплитуды колебания до  $s = 70,6$  мм и полезной площади насадки до  $F_n = 1,5$  м<sup>2</sup>, максимальные значения объемного коэффициента массопередачи наблюдаются в следующих интервалах:  $s = 60-80$  мм,  $F_n = 1-1,5$  м<sup>2</sup>.

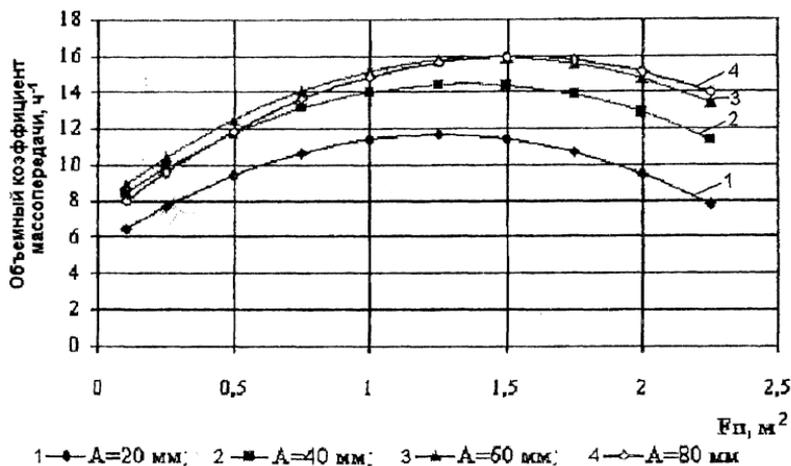


Рисунок 3 – Зависимость объемного коэффициента массопередачи от полезной площади насадки

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яковчиц, М.В. Методы и сооружения для очистки производственных сточных вод молокоперерабатывающих предприятий от органических загрязнений / Брестский гос. технич. ун-т. – Брест, 2003. – 20 с. – Деп. В БелИСА 9.06.03 - № Д200342 // Реф. сборник непубликуемых работ № 1 (27).
2. Яромский В.Н., Яковчиц Определение основных параметров биохимической очистки в пульсационных биореакторах. // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. 2002. – № 2 (14). – С. 55 – 56.

3. Пат. 810 ВУ, МКИ С 02F 3/10. Устройство для биологической очистки сточных вод / В.Н. Яромский, М.В. М.В. Яковчиц № u20020178; заявл. 17.06.2002; Опубл. 1.11.2002 / Гос. реестр полезн. моделей.
4. Рамм, В.М. Адсорбция газов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
5. Кафаров, В.В. Основы массопередачи. М.: Стройиздат, 1962. – 655 с.
6. Марченко, Ю.Г. Методика экспериментальных исследований массообменных характеристик аэраторов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 12 ч. 1. – 20 с.
7. Аэров, М.Э., Меньшиков, В.А., Трайкина, С.С. ЖПХ, 1967. Т. 40, № Н. – С. 852-863.
8. Винтер, А.А., Багачев, Э.С. Теория и практика перемешивания в жидких средах. М.: НИИТЭхим, 1976. – С. 113-115.
9. Ленский, Б.П., Климухин, В.Д. Массообменные свойства биофильтров с различными нагрузками // Химия и технология воды. № 6, 1992. – С. 469-475.
10. Traitment biologique aerobie: l'apport de l'electricite / Gardais D. // Industrie (fr.). – 1991. – №8 – р. 53 – 55. // РЖ “Химия”, 19И. Общие вопросы химической технологии, №6, М. 1992. – 48 с.
11. Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.
12. Городецкий, И.Я., Васин, А.А. [и др.]. Вибрационные массообменные аппараты. – М.: Химия, 1980. – 188 с.

УДК 628.543

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси),  
М.В. Яковчиц (БГТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИОННОГО БИОРЕАКТОРА**

При расчете сооружений биологической очистки необходимо использовать истинное значение кинетических коэффициентов [1].

С целью получения зависимостей, позволяющих осуществить технологический расчет пульсационного биореактора необходимо было определить:

- удельную скорость изъятия органических загрязнений при различных органических нагрузках на аппарат -  $\rho$  ;
- максимальную удельную скорость изъятия органических загрязнений в биореакторе -  $\rho_{\max}$  ;
- константу полунасыщения –  $K_L$ .

Исследования проводились на базе ОАО «Пружанский молочный комбинат» на пилотной установке, изображенной на рисунок 1. Технологическая схема с максимальной производительностью 1,5 м<sup>3</sup>/сут состояла из пульсационного биореактора (2) с рабочим объемом 0,031 м<sup>3</sup>, вторичного отстойника (4) общим объемом 0,143 м<sup>3</sup> и уплотнителя-регенератора (6) емкостью 0,05 м<sup>3</sup>.

Сточная жидкость к экспериментальной установке подводилась по напорному трубопроводу (1). Рециркуляционная биомасса из вторичного отстойника (4), пройдя уплотнение в уплотнителе-регенераторе (6), подавалась в пульсационный биореактор при помощи рециркуляционного насоса (7). Воздух в аппарат подавался при помощи компрессора УК-1М (8), расход воздуха определялся при помощи ротаметра РС-5 (9).

После пульсационного биореактора (2) смесь сточной жидкости и биомассы, пройдя через воздухоотделитель (3), подавалась во вторичный вертикальный отстойник (4), где происходила седиментация биомассы, участвующей в процессе биологической очистки.

Осветленная во вторичном отстойнике жидкость при помощи гибкого шланга (5) сбрасывалась в колодец городской канализации.

Насадка биореактора состояла из набора перфорированных дисков, изготовленных из винилпласта, диаметром 200 мм, толщиной 6 мм. Площадь перфорации – 3,84 % площади диска, диаметр перфорированных отверстий – 8 мм. Расстояние между дисками составляло 12 мм, общее число дисков – 15 шт. Возвратно-поступательные колебания насадке сообщались с частотой  $n = 1,3$  Гц и амплитудой  $s = 67$  мм.

При проведении исследований была выявлена следующая закономерность – удельная скорость изъятия загрязнений  $\rho$  при изменении исходной концентрации  $L_0$  меняется и это происходит до тех

пор, пока удельная скорость изъятия загрязнений  $\rho$  не станет  $\rho_{\max}$  – максимальной.

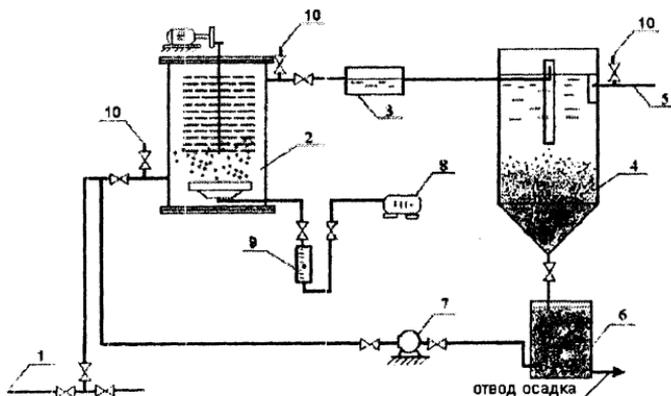


Рисунок 1 – Схема пилотной установки пульсационного биореактора  
 1 – напорный трубопровод производственной канализации; 2 – пульсационный биореактор; 3 – воздухоотделитель; 4 – вторичный отстойник; 5 – отвод очищенных стоков; 6 – уплотнитель регенератор рециркуляционной биомассы; 7 – рециркуляционный насос; 8 – компрессор; 9 – ротаметр; 10 – проботборник

При установившемся значении исходной концентрации загрязнений  $L_0$  периодически, через каждые 10 мин, отбирали пробы для проведения анализа ХПК, этот процесс длился до постоянства скорости изъятия органических загрязнений ( $\rho = \text{const}$ ) для данной  $L_0$ . С момента изменения  $L_0$  меняется и  $\rho$ , промежуток времени  $\tau$ , необходимый для установления постоянного значения  $\rho$  называется временем адаптации биоценоза.

Условия проведения эксперимента перечислены в таблице 1.

В процессе проведения эксперимента определяли удельную скорость изъятия загрязнений  $\rho$ , по формуле

$$\rho = \frac{L_0 - L_e}{\left(a_{\text{эвс}} + \frac{a_{\text{нр}} \cdot F}{V_e \cdot 1000}\right) \cdot (1 - z) \cdot t}, \frac{\text{мг}}{\text{г} \cdot \text{ч}}, \quad (1)$$

где  $t$  – время пребывания (аэрации) сточных вод в биореакторе, ч.

Таблица 1 – Условия проведения эксперимента

Наименование показателя	Интервал изменения
Температура, °С	18 – 26
Активная реакция среды pH	6,5 – 8
Исходная концентрация загрязнений по БПК <sub>полн</sub> $L_0$ , мг/л	849 – 3500
Гидравлическая нагрузка, $\text{суг}^{-1}$	41,16
Время аэрации, ч	0,583
Доза взвешенной биомассы $a_{\text{взв}}$ , г/л по сухому веществу	4,2 – 4,8
Концентрация прикрепленной биомассы $a_{\text{пр}}$ , г/м <sup>2</sup> по сухому веществу	14,0 – 16,0

После чего построили график вида  $\rho = f(L_e)$ , построенная по данным эксперимента зависимость показала асимптотическую стабилизацию  $\rho$  при возрастании  $L_e$  (рост концентрации  $L_e$  обусловлен увеличением исходной концентрации загрязнений  $L_0$ ), это дает возможность аппроксимировать результаты эксперимента зависимостью вида (2), (3):

$$\text{- модель Моно: } \rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e}{K_L + L_e}, \quad (2)$$

$$\text{- модель Вавилина: } \rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e^2}{K_L^2 + L_e^2}. \quad (3)$$

Определение параметров  $\rho_{\max}$  и  $K_L$  выполнили по методу наименьших квадратов [2, 3].

Рассмотрим функции невязок, и исследуем их на минимум:

$$- \text{ для модели (2): } f(K_L, \rho_{\max}) = \sum_{i=1}^n \left( \rho_i - \frac{\rho_{\max} \cdot L_i}{K_L + L_i} \right)^2; \quad (4)$$

$$- \text{ для модели (3): } f(K_L, \rho_{\max}) = \sum_{i=1}^n \left( \rho_i - \frac{\rho_{\max} \cdot L_i^2}{K_L^2 + L_i^2} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\rho_i, L_i$  – значения  $i$ -ого эксперимента;

$n$  – количество опытов.

Условия минимума целевой функции:

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\rho_{\max}} &= 0; \\ \frac{df}{dK_L} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты дифференцирования:

$$\begin{aligned} - \text{ для модели (2)} \quad \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{K_L + L_i} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^2} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{(K_L + L_i)^2} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^3} &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} - \text{ для модели (3)} \quad \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{K_L^2 + L_i^2} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^2} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{(K_L^2 + L_i^2)^2} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^3} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Системы (7), (8) нелинейные относительно параметра  $K_L$ , в то время, каждое из уравнений системы можно разрешить относительно  $\rho_{\max}$ :

$$- \text{ для модели (2) } \rho_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{K_L + L_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{(K_L + L_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^3}}; \quad (9)$$

$$- \text{ для модели (3) } \rho_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{K_L^2 + L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{(K_L^2 + L_i^2)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^3}}. \quad (10)$$

Так как знаменатели соотношений (9), (10) не обращаются в нуль, то для определения  $K_L$  можно составить функцию  $F(K_L)$  и найти ее нули: для (9):

$$F(K_L) = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{K_L + L_i} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^3} - \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{(K_L + L_i)^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^2}; \quad (11)$$

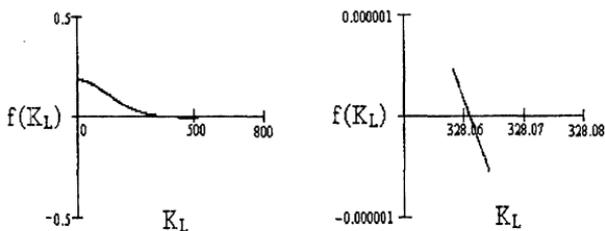
для (10)

$$F(K_L) = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{K_L^2 + L_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^3} - \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{(K_L^2 + L_i^2)^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^2}; \quad (12)$$

Итак, задача определения  $K_L$  свелась к решению уравнений  $F(K_L)=0$ . Вследствие нелинейности уравнений решение вышеупомянутой задачи можно получить только подбором. Подбор был реализован математическим пакетом MATCAD.

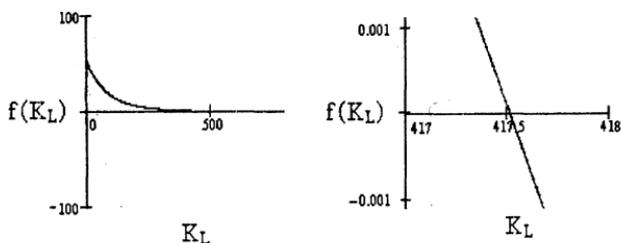
На рисунках 2 и 3 изображены значения  $K_L$ , полученные в результате подбора для уравнений (11), (12) соответственно

Для  $K_L$ , полученной по функции (11) находим  $\rho_{\max}$  по формуле (9), аналогично для  $K_L$ , полученной по функции (12) находим  $\rho_{\max}$  по формуле (10).



$$K_L = 328,061$$

Рисунок 2 – Значение константы полунасыщения для (11)



$$K_L = 417,51$$

Рисунок 3 – Значение константы полунасыщения для (12)

Исходные данные и построенные теоретически зависимости представлены на графиках (рисунки 4, 5).

Оценку точности результатов аппроксимации выполнили по среднеквадратичному отклонению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( \rho_i - \frac{\rho_{\max} L_i}{K_L + L_i} \right)^2}{n}} . \quad (13)$$

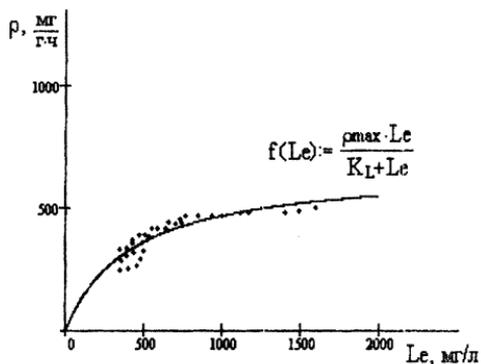


Рисунок 4 – Зависимость удельной скорости от концентрации загрязнений по математической модели Моно (2)

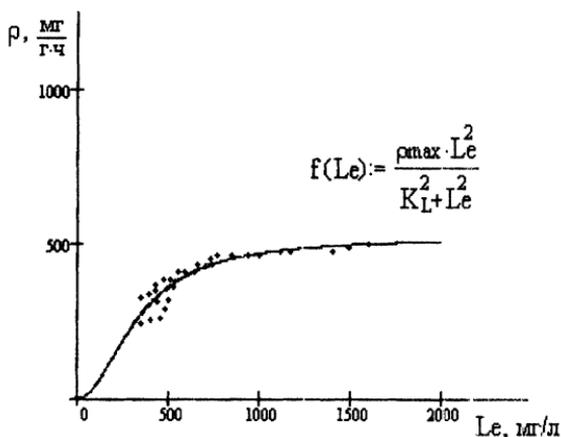


Рисунок 5 – Зависимость удельной скорости от концентрации загрязнений по обобщенной модели Вавилина (3)

Результаты расчетов сведены в таблице 2.

По оценкам среднеквадратичного отклонения можно сделать вывод о том, что обобщенная модель Вавилина вида (3) лучше аппроксимирует экспериментальные точки, чем классическая модель Моно (2). Таким образом, для расчета удельной скорости окисления

органических загрязнений  $\rho$ , при проектировании пульсационного биореактора, окончательно будет использоваться модель вида (3).

Таблица 2 – Кинетические константы, полученные в результате расчета

Тип установки, источник загрязнений	$\rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e}{K_L + L_e}$ (2)			$\rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e^2}{K_L^2 + L_e^2}$ (3)		
	$\rho_{\max}, \frac{мг}{г \cdot ч}$	$K_L, мг/л$	$\sigma$	$\rho_{\max}, \frac{мг}{г \cdot ч}$	$K_L, мг/л$	$\sigma$
Пульсационный биореактор, ПСВ Пружанского молочного комбината	695,391	417,510	32,511	521,801	328,061	28,572

Поскольку биохимический состав производственных сточных вод предприятий молокоперерабатывающей отрасли идентичен [4, 5], кинетические константы, полученные в процессе эксперимента для сточных вод Пружанского молочного комбината

( $\rho_{\max} = 521,801 \frac{мг}{г \cdot ч}$ ;  $K_L = 328,061$  мг/л) вполне применимы и для других предприятий данного профиля.

Таким образом, в результате проведения эксперимента были получены значения кинетических коэффициентов, характерных для процесса биологической очистки в пульсационном биореакторе, которые и будут приниматься за основу при технологическом расчете. В результате аппроксимации экспериментальных данных установлено, что процесс биологической очистки в пульсационном биореакторе наилучшим образом описывает обобщенная модель Вавилина вида (3), которая и будет взята за основу при проектировании биореактора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев, С.В., Карюхина, Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
2. Валах, В.П. Очистка сточных вод маломощных молокоперерабатывающих предприятий на дисковых биофильтрах: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.04. – Полтава, 1987. – 137 с.
3. Корн, Г., Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: 1978. – 832 с.
4. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности. С.М. Шифрин, Г.В. Иванов [и др.]. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 272 с.
5. Шифрин, С.М., Мишуков, Б.Г. Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1968. – 117 с.

УДК 628.3

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси)

### **КОМБИНИРОВАННЫЕ СООРУЖЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Биологическая очистка сточных вод имеет вековой опыт практического использования и продолжает развиваться, а её резервы еще далеко не исчерпаны. В связи с возрастающим количеством сточных вод, которые необходимо очищать, на смену естественным методам очистки (поля фильтрации, поля орошения, биопруды) пришли аэротенки и биофильтры. Однако, и эти главные сооружения искусственной биологической очистки сточных вод имеют существенные недостатки. Аэротенкам присуща большая энергоёмкость, а биофильтрам небольшая пропускная способность.

Поиск оптимальных технологических решений в области очистки сточных вод способствовал созданию комбинированных сооружений, которые имеют признаки аэротенков и биофильтров. Процесс биологической очистки в комбинированном сооружении зави-

сит от двух основополагающих факторов – благоприятных условий жизнедеятельности свободноплавающего и прикреплённого биоценозов.

В [1] приведена примерная классификация комбинированных сооружений биологической очистки сточных вод по группам и подгруппам. Наибольший интерес вызывает группа комбинированных сооружений на основе погружных дисковых биофильтров.

С целью интенсификации и реконструкции циркуляционно-окислительных каналов (ЦОК), а также при новом строительстве, ЦОКи блокируются с погружными дисковыми биофильтрами (ПДБФ) [2]. В этом случае значительно повышается окислительная мощность этого комбинированного сооружения. На рисунке 1 представлена конструкция ЦОКа с ПДБФ.

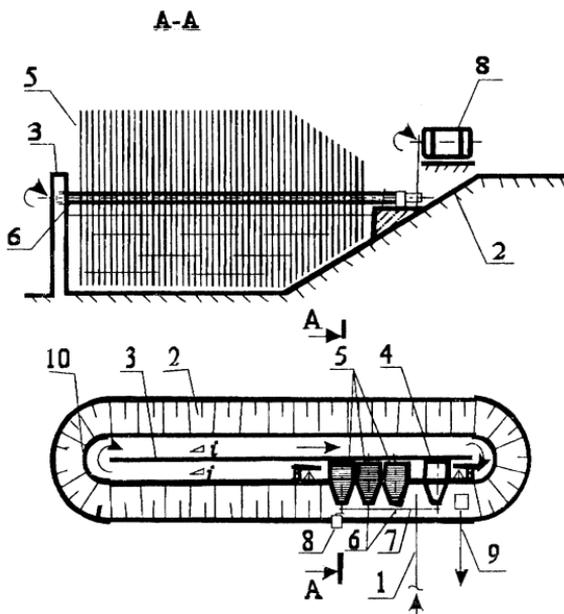


Рисунок 1 – Схема циркуляционно-окислительного канала с ПДБФ

Сооружение ЦОК с ПДБФ, предназначенное для биохимической очистки сточных вод, состоит из трубопровода ввода 1, канала 2, расчлененного продольной перегородкой 3 на две части, лопастного

устройства 4, перфорированных дисков 5 (рисунок 2), смонтированных на валах 6, единой цепной передачи 7 и электродвигателя с редукторами 8, а также трубопровода вывода и трубопровода опорожнения 9.

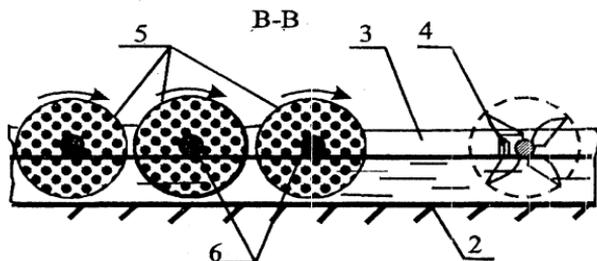


Рисунок 2 – Фрагмент установки дисков и лопастного устройства

Комбинированное сооружение работает следующим образом. Сточная жидкость по трубопроводу 1 поступает в одну из частей канала. С помощью лопастного устройства 4 создается циркуляция сточной жидкости по каналам, а также аэрация. Увлекаемая потоком сточная жидкость проходит через перфорированные диски 5, на горизонтальных валах 6 и погруженные в обрабатываемую сточную жидкость на 0,45 диаметра. Вращение валов 6 с дисками 5 и лопастного устройства 4 осуществляется через общую цепную передачу 7 от электродвигателя-редуктора 8. При прохождении сточных вод через пространство между перфорированными дисками 5 биохимическое окисление органических загрязнений происходит за счет фиксированного (прикрепленного) на поверхности перфорированных дисков биоценоза. Далее сточная жидкость вместе с отторгнутой биомассой циркулирует по каналам сооружения, где происходит дальнейшее окисление органических загрязнений свободноплавающей биомассой, очищенная сточная жидкость выводится из сооружения по трубопроводу 9.

В комбинированном сооружении совмещены процессы биохимического окисления загрязнений сточных вод, как за счет прикрепленной, так и за счет свободноплавающей биопленки. Ввиду отсутствия сложных аэрационных систем сооружение характеризуется простотой конструкции и незначительным энергопотреблением.

К группе комбинированных сооружений биологической очистки сточных вод можно отнести также сооружения, которые кроме свободноплавающего и прикрепленного биоценоза имеют двойное функциональное назначение. Например, дисковый биофильтр-отстойник [3], который предназначен для биохимической очистки и отстаивания сточных вод.

Дисковый биофильтр-отстойник (рисунок 3) состоит из корпуса вертикального отстойника 1, подводящего трубопровода 2, распределительного лотка 3, погружной перегородки 4, дисковых биофильтров 5, смонтированных на валах 6 и закрепленных на раме 7, роликов 8, с помощью которых рама 7 опирается на монорельс 9, расположенный по периметру корпуса вертикального отстойника 1, электродвигателя с редуктором и ведущим роликом, закрепленных на раме 7 и приводящим ее в движение в горизонтальной плоскости, трубопровода 11 для отвода осажденной биопленки, сборной воронки 12, и трубопровода для отвода очищенной воды.

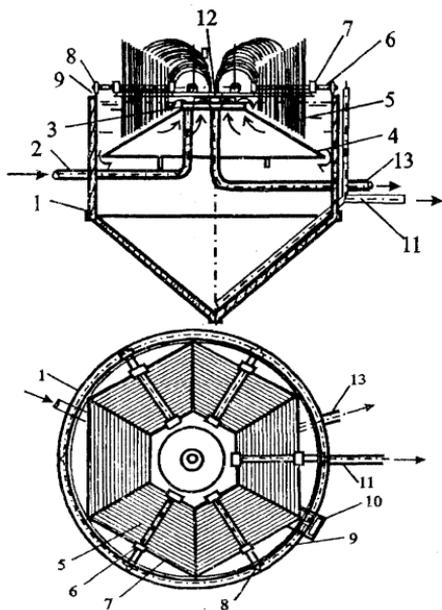


Рисунок 3 – Дисковый биофильтр-отстойник

Дисковый биофильтр-отстойник работает следующим образом. Сточная вода по подводящему трубопроводу 2 поступает в распределительный лоток 3, откуда перетекает в камеру биохимического окисления, отделенную от зоны отстаивания погружной перегородкой 4. Вращение дисковых биофильтров 5, смонтированных на валах 6, осуществляется следующим образом: электродвигатель с редуктором и ведущим роликом 10, опираясь на монорельсе 9, расположенной по периметру корпуса вертикального отстойника 1, приводит во вращение в горизонтальной плоскости раму 7. При этом ролики 8, опирающиеся на монорельсе 9, начинают вращаться, приводя в движение валы 6 дисковых биофильтров 5. Дисковые биофильтры 5 вращаются в вертикальной плоскости. Процесс биохимической очистки сточных вод в зоне биохимического окисления идет за счет фиксированного на поверхности перфорированных дисков 5 биоценоза, а также за счет свободноплавающего. Обработанная в зоне биохимического окисления сточная вода вместе с отторгнутой биопленкой проходит между перегородкой 4 и корпусом вертикального отстойника и попадает в зону отстаивания, где происходит осаждение отторгнутой биопленки. Осветленная вода через сборную воронку 12 и отводящий трубопровод 13 отводится из сооружения, а выпавшая в результате отстаивания биопленка отводится из сооружения по трубопроводу 11 под гидростатическим напором.

В дисковом биофильтре-отстойнике совмещаются процессы биохимического окисления и отстаивания сточной жидкости, что позволяет сэкономить площади, занимаемые очистными сооружениями. Компактность достигается за счет рационального расположения дисковых биофильтров над отстойниками. Привод во вращение дисковых биофильтров одним электродвигателем с редуктором упрощает механическую часть сооружения, сокращает потребление электроэнергии.

На базе вертикального отстойника диаметром 6 м разработан строительный проект дискового биофильтра-отстойника, который в настоящее время работает в составе локальных очистных сооружений Пружанского молочного комбината. На рисунке 4 показан дисковый биофильтр-отстойник в цехе станции биофильтрации Пружанского молочного комбината в период после его монтажа.

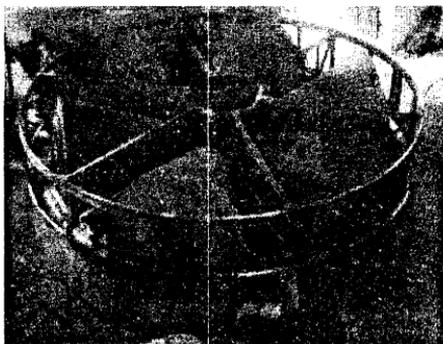


Рисунок 4 – Дисковый биофильтр-отстойник после завершения монтажных работ

Шнековый биореактор предназначен для биохимической очистки и подкачки сточных вод. Биореактор (рисунок 5) состоит из подводящего коллектора 1, приемного резервуара 2, биофильтра выполненного из наклонно установленных шнековых подъемников 3, лопасти которых снабжены пронизывающими струнами со стеклоершами 4, сборного лотка 5, рециркуляционного устройства, выполненного в виде многоступенчатых перепадов 6, задвижки 7 на отводящем коллекторе.

Шнековый биореактор работает следующим образом. Сточная вода по подводящему коллектору 1 самотеком поступает в приемный резервуар 2 и далее шнековым подъемником 3, лопасти которого снабжены пронизывающими их струнами со стеклоершами 4 (фрагмент шнека со стеклоершами показан на рисунке 6), перекачивается в сборный лоток 5. На поверхности лопастей и стеклоершей 4 в процессе перекачки сточной жидкости развивается фиксированный биоценоз. При вращении шнекового подъемника 3 он попеременно контактирует со сточной водой и кислородом воздуха, при этом идет процесс биохимической очистки сточной жидкости фиксированным на поверхностях вращающихся носителей биоценозом. Для интенсификации процесса биохимической очистки предусмотрена рециркуляция смеси сточной воды с отторгнутой биопленкой по рециркуляционным каналам, выполненным в виде многоступенчатых перепадов, для увеличения степени насыщения смеси сточной жидкости и отторгнутой биопленки кислородом воздуха. Открытием (или закрытием) задвижки 7 изменяют соотношение рас-

ходов очищенной сточной жидкости и рециркуляционной смеси, тем самым регулируя течение процесса биохимической очистки путем изменения продолжительности контакта сточной жидкости с фиксированным биоценозом. Очищенная сточная жидкость отводится из биореактора отводящим коллектором 8.

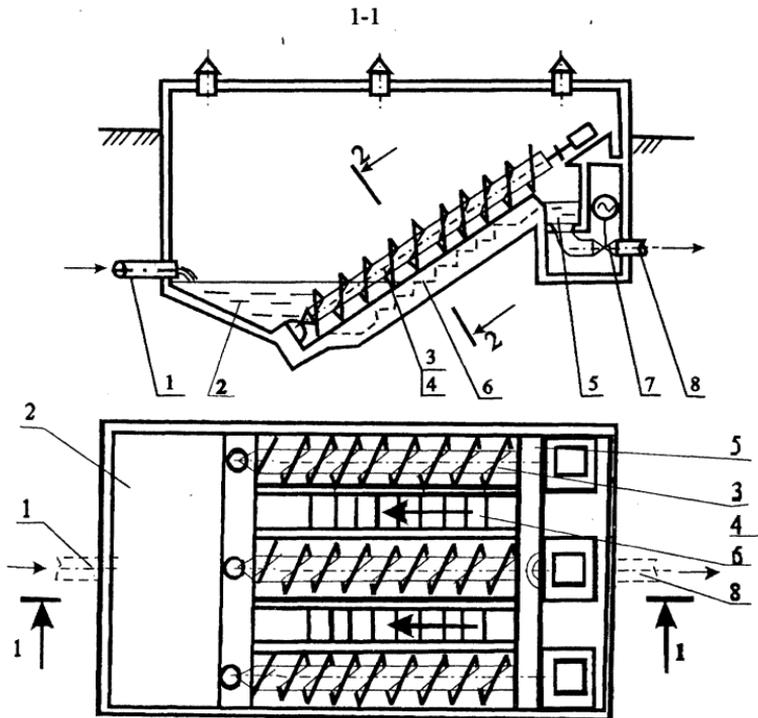


Рисунок 5 – Шнековый биореактор



Рисунок 6 – Фрагмент шнека со стеклошарами

Шнековый биореактор для очистки и подкачки сточных вод позволяет совместить процессы биохимической очистки и перекачки сточной жидкости, повысить эффективность процесса очистки за счет увеличения поверхности контакта жидкости с прикрепленным биоценозом, рециркуляции и насыщения сточной жидкости кислородом воздуха на ступенях перепада, при этом отсутствует расход электроэнергии на принудительную аэрацию сточной жидкости. Конструкция проста и надежна в работе. Кроме того, применение шнекового биореактора на стадии локальной очистки производственных сточных вод молокоперерабатывающего предприятия позволит за счет совмещения процессов биологической очистки и перекачки избежать больших заглублений водоотводящих коллекторов на участках присоединения общезаводских выпусков к городской сети водоотведения.

Выводы:

1. Применение комбинированных сооружений, имеющих признаки аэротенков и биофильтров, позволяет сгладить недостатки биоокислителей обоих видов.
2. При применении комбинированных сооружений значительно повышается эффективность очистки при снижении капитальных вложений и эксплуатационных затрат.
3. Комбинированные сооружения можно применять как для очистки бытовых сточных вод, так и для очистки высококонцентрированных по органическим загрязнениям производственных сточных вод.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев, С.В., Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Учебник для вузов: - М.: АСВ, 2002. – 704 с.
2. Пат. С1 ВУ. СО2 F 3/22. Устройство для биологической очистки сточных вод / В.Л. Ковальчук, А.Н. Янчук, В.Н. Яромский. – №4040; Заявл. 16.05.97; Оpubл. 16.03.01 // Дзярж. Пат. Камітэт Рэспублікі Беларусь. 2001.
3. Пат. С1 Ru. СО2 F 3/06. Дисковый биофильтр-отстойник / В.Н. Яромский [и др.]. – №2022939; Заявл. 17.12.90; Оpubл. 15.11.94. Бюл. №21 // Комитет РФ по патентам и товарным знакам, 1994.

4. Авт. свид. СССР. CO2 F 3/06. Биореактор для очистки и подкачки сточных вод / Яромский В.Н. [и др.]. – №1724601. Заявл. 28.11.89; Оpubл. 07.04.92 Бюл. №3 // Гос. Комитет по изобр. и открытиям при ГК НТ СССР.

УДК 628.112

В.В. Ивашечкин (БНТУ)

## **РЕГЕНЕРАЦИЯ СКВАЖИННЫХ ФИЛЬТРОВ С ПОМОЩЬЮ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ**

### **Вводная часть**

Представляет интерес способ регенерации фильтров водозаборных скважин, основанный на использовании энергии, выделяющейся при вводе мелкораспыленного жидкого азота в жидкость замкнутой камеры, сообщающейся с фильтром, либо при подводном выхлопе непосредственно в зону фильтра газообразного азота высокого давления, полученного в отдельной испарительной камере [1-4]. В обоих случаях выделяющаяся энергия преобразуется в энергию волн сжатия и разрежения, возникающих при пульсациях газового пузыря, и кинетическую энергию гидродинамического потока. Совместное действие этих факторов приводит к разрушению кольматирующих отложений и интенсифицирует их растворение при осуществлении способа в реагенте.

Наиболее близким по своей технической сущности предлагаемому способу является пневмореагентный способ регенерации, который представляет собой выхлоп сжатого воздуха в полость фильтра, заполненного реагентом [5]. Исследования, проведенные К.Н. Андреевым по изучению пневмореагентного способа, показали, что интенсивность растворения кольматирующих отложений при пневмоимпульсном воздействии в растворе реагента по сравнению с реагентной ванной возрастает в 8-15 раз. Пневмореагентный способ регенерации наиболее эффективен в скважинах, каптирующих рыхлые отложения со сроком эксплуатации 5-8 лет. Оборудо-

вание, применяемое для реализации пневморегентного способа, включает компрессор высокого давления, шланги, баллоны, пневмоснаряд и является достаточно сложным. Кроме этого сжатый воздух содержит 21% кислорода, который, попадая в прифилтрованную зону, окисляет двухвалентное железо и усиливает кольматационные процессы, укорачивая межремонтный период скважины. Кроме того кислород окисляет основной реагент - дитионит натрия и снижает его растворяющую способность [5].

Применение жидкого азота в качестве энергоносителя позволит упростить технологическое оборудование и исключить окисление железа и реагента.

### **Основная часть**

**Физические основы импульсно-криогенного способа регенерации** Жидкий азот обладает высокой удельной энергоемкостью. Повышение давления в замкнутой или испарительной камерах происходит в результате резкого увеличения объема газа при испарении. Определим энергоемкость  $\mathcal{E}$  жидкого азота как работу  $A$ , которую может совершить 1 грамм - моль жидкого азота с молекулярным весом  $M \cdot B \cdot N$  равным 28 г при переходе из жидкого состояния в газообразное при атмосферном давлении  $p_{атм}$ :

$$A = p_{атм} (V_г - V_{ж}), \quad (1)$$

где  $V_г$  – объем 1 грамм-моля газообразного азота при нормальных условиях,  $V_г = 0,0224\text{м}^3$ ;  $V_{ж}$  – объем, который занимает 1 грамм-моля жидкого азота до расширения;  $p_{атм} = 10^5$  Па.

Величину  $V_{ж}$  найдем через плотность  $\rho_{ж}$  жидкого азота по формуле

$$V_{ж} = \frac{M \cdot B \cdot N}{\rho_{ж}}. \quad (2)$$

Окончательно получим

$$A = p_{атм} \left( V_г - \frac{M \cdot B \cdot N}{\rho_{ж}} \right). \quad (3)$$

При подстановке  $M.B.N = 0,028\text{кг}$ ,  $\rho_{ж} = 808 \text{ кг/м}^3$ ,  $V_I = 0,0224\text{м}^3$ ,  $p_{атм} = 10^5\text{Па}$  в выражение (3) получим, что энергоемкость 1грамма - моля жидкого азота составляет  $\mathcal{E}_N = A=2,24 \text{ кДж}$ . Отсюда следует, что энергоемкость  $\mathcal{E}_N$  одного килограмма жидкого азота составляет  $\mathcal{E}_N = 80 \text{ кДж}$ , что подтверждает его высокую удельную энергоемкость.

Давление  $p$ , возникающее при испарении сжиженного газа в замкнутом объеме, можно определить по формуле [6]

$$p = k \frac{V_{ж}}{V_K} (1 + \beta t), \quad (4)$$

где  $k$ - постоянная величина, зависящая от свойств используемого газа;  $V_{ж}$ - объем жидкого газа;  $V_K$ - объем замкнутой камеры;  $\beta$ - коэффициент, зависящий от вида сжиженного газа ( $\beta = 0,003674$  для азота);  $t$ - температура камеры.

В качестве сжиженного газа можно использовать сжиженный воздух, кислород, азот и другие газы. Наиболее удобен жидкий азот, так как введение кислорода и воздуха в зону фильтра скважины может вызвать окисление двухвалентного железа в прифилтровой зоне и интенсифицировать химические, а также, и биологические кольматационные процессы. Кроме того, азот, являясь попутным газом при получении кислорода из воздуха, имеет более низкую стоимость и широко применяется в криогенной технике. Легко транспортируется в сосудах Дьюара.

При испарении 1л жидкого азота плотностью  $\rho_N = 808\text{кг/м}^3$  при  $0^\circ\text{C}$  образуется  $650 \text{ дм}^3$  газа при Н.У. При подстановке в формулу (4) данных для жидкого азота, испаряющегося в температурных условиях скважины ( $\beta = 0,003674$ ,  $t = 10^\circ\text{C}$ ,  $k = 650$ ), получим

$$p \approx 670 \frac{V_{ж}}{V_K}. \quad (5)$$

Анализ формулы (2) показывает, что при  $V_{ж} = V_K$  давление в замкнутом объеме может возрасти в 670 раз к исходному давлению.

Работа с жидким азотом безопасна, испаряется он практически бесшумно. Скорость возрастания давления в камере, в которую вводится жидкий азот, определяется скоростью его ввода и интенсивностью теплообмена. Интенсивность теплообмена можно повысить, если вводить жидкий азот в воду. Чтобы вода при подаче в нее жидкого азота не замерзала, необходим расчет достаточных объемов воды и азота.

**Расчет энергозатрат при декольматации фильтров импульсно-криогенным способом.** Рассмотрим процессы, происходящие при накоплении газообразного азота в полости скважинного прибора и выхлопе в жидкость из выхлопных окон (рисунок 1).

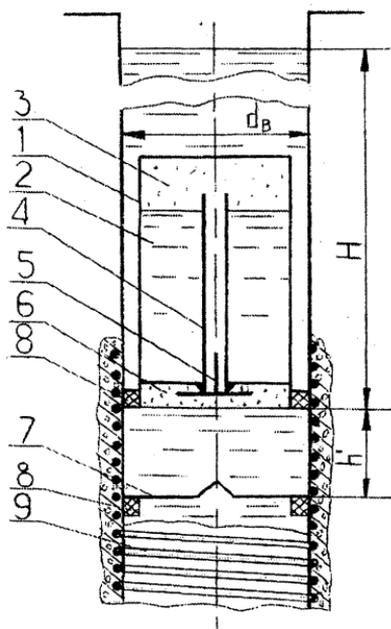


Рисунок 1. Расчетная схема для определения энергозатрат поинтервального импульсно-криогенного способа

1-корпус; 2- емкость с жидким азотом;

3- испарительная камера; 4-центральный патрубков; 5- импульсный клапан;

6- рабочая камера; 7-отражатель; 8-пакеры; 9- проволоочная навивка

Пусть в скважину на глубину  $H$  поместили скважинное криогенно-импульсное устройство, состоящее из корпуса 1, емкости 2 с жидким азотом кольцевой формы, испарительной камеры 3, центрального патрубка 4 с импульсным клапаном 5 в нижней части, рабочей камеры 6 с отражателем 7 и пакерами 8. Находящийся в емкости 2 жидкий азот в результате подвода тепла извне испаряется и накапливается в испарительной камере 3. При достижении некоторого давления сжатого азота открывается импульсный клапан 5 и сжатый азот истекает через отверстие клапана 5 в рабочую камеру 6, которая сообщается с полостью фильтра.

Пусть в испарительной камере 3 скважинного снаряда перед открытием импульсного клапана находится сжатый газ с параметрами  $V_{кам}$  и  $p_{кам}$ . Участок обрабатываемого фильтра закольматирован и ограничен снизу и сверху горизонтальными пакерами 8. Истекающий через клапан 5 сжатый газ заполняет рабочую камеру 6. Импульсный клапан 5 закрывается. В рабочей камере 6 после закрытия клапана 5 формируется газовая полость высокого давления с начальными параметрами  $p_{нач}$  и  $V_{нач}$ . В жидкости распространяется волна давления, вызванная образованием полости. Газовая полость расширяется, в результате чего происходит деформация проволочной навивки 9 каркасно-стержневого фильтра с образованием трещин в слое цементированной гравийной обсыпки.

Для расчета необходимых энергозатрат воспользуемся методикой, изложенной в работе [7].

После образования газовой полости, задачу распространения волны давления в полости закольматированного фильтра можно рассматривать как распространение гидравлического удара в тупиковом трубопроводе, когда к участку фильтра высотой  $h'$  внезапно подключили источник высокого давления (газовую полость). Давление на границе газовая полость – жидкость резко возрастает на величину

$$\Delta p_{уд} = p_{нач} - p_0. \quad (6)$$

Волна давления со скоростью  $c$  перемещается к стенке фильтра, имея давление на фронте равное  $\Delta p_{уд}$ . Скорость жидкости в плоскости фронта возрастает от  $0$  до  $v_0$ , ее можно найти по формуле

$$v_0 = \frac{\Delta p_{уд}}{\rho c}. \quad (7)$$

При подходе фронта волны давления к закольматированному фильтру вся жидкость на участке длиной  $h'$  приобретает скорость  $v_0$ , однако, ее дальнейшее движение невозможно из-за наличия паверов и скорость жидкости на фильтре в момент прихода волны будет уменьшаться до  $0$ .

При достижении прямой волной поверхности фильтра, давление в полости фильтра на участке обработки длиной  $h'$  будет равно  $p_1 = p_0 + \Delta p_{уд}$ , при этом жидкость будет сжиматься, а стенки закольматированного фильтра - расширяться.

Будем считать, что энергия газовой полости  $W_{г.пол.}$  согласно [7] затрачивается на энергию гидропотока  $W_{г.п.}$ , на работу по сжатию жидкости  $W_{с.ж.}$  и работу по декольматации стенок фильтра  $W_{д.с.}$ :

$$W_{г.п.} + W_{с.ж.} + W_{д.с.} = W_{г.пол.} \quad (8)$$

Левая часть выражения (8) определяется по методике [7].

Реализованную энергию газовой полостью  $W_{г.пол.}$  можно найти как сумму работ, произведенных волной сжатия  $E_{в.с}$  и газовым пузырем  $E_{п.}$ , т.е.

$$W_{г.пол.} = E_{в.с} + E_{п.} \quad (9)$$

Величину  $E_{в.с}$  найдем через акустический кпд  $\eta_a$ , который представляет собой долю запасенной потенциальной энергии  $E_{нач}$

газовой полости в момент ее образования с начальным объемом  $V_{нач.}$ , уносимую волной сжатия :

$$E_{в.с.} = \eta_a \cdot E_{нач} = \eta_a \frac{p_{нач} V_{нач}}{k-1}. \quad (10)$$

Для определения акустического к.п.д.  $\eta_a$  расширяющейся подводной газовой полости воспользуемся результатами испытаний пневмоизлучателей сейсмического сигнала при морской сейсморазведке [8]. Определенные расчетным путем значения  $\eta_a$  для расширяющейся газовой сферы при различных значениях  $p_{нач}/p_0$  и  $k$ , где  $p_0$  - начальное давление в месте выхлопа, приведены в таблице 1 [8].

Таблица 1 – Расчетные значения акустического КПД для расширяющейся газовой сферы под водой [8]

$p_n/p_0$	Начальное давление газов внутри полости, $10^5$ Па									
	10		30		60		100		150	
	Показатель адиабаты газов $k$									
	1,25	1,4	1,25	1,4	1,25	1,4	1,25	1,4	1,25	1,4
Акустический КПД $\eta_a$ , %										
10	0,9	1,26	1,58	2,22	2,0	3,09	2,87	3,94	3,5	4,83
30	-	-	2,13	2,74	3,02	3,88	4,01	5,25	5,0	6,32
60	-	-	-	-	3,58	4,32	4,6	5,55	5,65	6,78
100	-	-	-	-	-	-	5,01	5,85	6,2	7,18
150	-	-	-	-	-	-	-	-	6,5	7,32

Величину  $E_n$  найдем согласно [7] по формуле

$$E_{\text{п}} = \eta_{\text{г}} E_{\text{нач}} K_{\text{э}} \left[ 1 - \left( \frac{V_{1.\text{п.}}}{V_{2.\text{п.}}} \right)^{k-1} \right], \quad (11)$$

Гидравлический к.п.д.  $\eta_{\text{г}}$  (отношение потенциальной энергии  $E_{\text{пот}}$  газовой полости, равной работе против сил внешнего давления  $p_0$ , к начальной энергии газовой полости  $E_{\text{нач}}$ ) найдем, воспользовавшись результатами скоростной съемки подводного выхлопа сжатого воздуха из пневмокамеры, представленными на рисунке 2 [8].

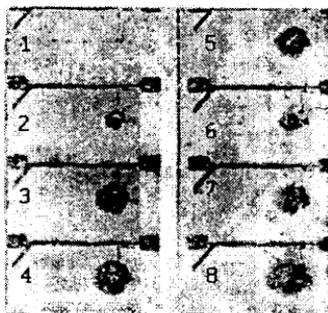


Рисунок 2 – Фотограммы подводного выхлопа сжатого воздуха из камеры объемом  $V_{\text{кам}}=1\text{дм}^3$  при давлении в камере  $p_{\text{кам}}=100 \cdot 10^5 \text{Па}$ , интервал времени между кадрами равен 0,015с

По снимкам (рисунок 2) газовая полость как в момент ее образования (кадр 2), так и при достижении максимальных размеров (кадр 4) имеет форму, близкую к сфере. По замерам отношение максимального давления в газовой полости  $p_{\text{нач}}$  к начальному давлению в рабочей камере  $p_{\text{кам}}$  не превышает 0,4, т.е.  $p_{\text{нач}}/p_{\text{кам}}=0,4$  [8]. Тогда при давлении окружающей среды в месте выхлопа  $p_0 \approx 10^5 \text{Па}$  и  $p_{\text{кам}}=100 \cdot 10^5 \text{Па}$  получим

$$p_{\text{нач}} \approx 40 p_0 \approx 40 \cdot 10^5 \text{ Па}. \quad (12)$$

Из фотограммы (рисунок 2) следует, что соотношение максимального радиуса газовой полости  $R_{max}$  (кадр 4) к начальному радиусу газовой полости  $R_{нач}$  (кадр 2), т.е.  $R_{max} / R_{нач} \approx 2,1$ , отсюда

$$R_{max} \approx 2,1 R_{нач}. \quad (13)$$

Потенциальную энергию  $E_{пот}$  газовой полости, равную работе против сил внешнего давления  $p_0$ , найдем из выражения

$$E_{пот} = p_0 (V_{max} - V_{нач}). \quad (14)$$

Начальная энергия  $E_{нач}$  газовой полости перед расширением равна

$$E_{нач} = \frac{p_{нач} V_{нач}}{k - 1}. \quad (15)$$

Гидравлический к.п.д.  $\eta_r = E_{пот} / E_{нач}$  с учетом (14-15) равен

$$\eta_r = \frac{p_0 (V_{max} - V_{нач})(k - 1)}{p_{нач} V_{нач}}. \quad (16)$$

При подстановке (12-13) в выражение (16) и при  $k=1,4$  получим

$$\eta_r = \frac{p_0 \frac{4}{3} [(2,1 R_{нач})^3 - R_{нач}^3] (1,4 - 1)}{\frac{4}{3} R_{нач}^3 \cdot 40 p_0} \approx 0,085. \quad (17)$$

Подставив выражения (9)-(11) в уравнение (8) и выразив начальный объем  $V_{нач}$  газовой полости получим

$$V_{нач} \approx \frac{\pi r_0^2 h' \Delta p_{уд}^2 \left[ \frac{1}{2\rho c^2} + \frac{1}{2E_{ж}} + \frac{r_n S \psi_{пр}}{f_{пр} E_{пр}} \right] (k-1)}{P_{нач} \left\{ \eta_a + \eta_r K_3 \left[ 1 - \left( \frac{V_{1.п}}{V_{2.п}} \right)^{k-1} \right] \right\}} \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет определить объем сжатого азота, необходимый для создания трещин в закольматированной зоне скважинного фильтра высотой  $h'$  и толщиной  $\delta$ .

Рассмотрим пример.

#### ПРИМЕР.

Определить необходимое количество жидкого азота для создания сквозных трещин в закольматированной обсыпке при импульсной декольматации 1 м.п. каркасно-стержневых фильтров с провололочной навивкой, технические характеристики которых представлены в таблице 23 [9]. Если  $\delta = 0,06$  м, кубиковая прочность сцементированного гравия  $\bar{R}_{с.г.} = 2$  МПа, сопротивление растяжению  $R_{с.г.} = 0,37$  МПа,  $E_{с.г.} = 15000$  МПа. Провололочная навивка – сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) с модулем упругости  $E_{пр} = 240000$  МПа. Просвет провололочной навивки  $t = 2,5$  мм. Глубина обработки  $H = 70$  м, которой соответствует давление  $p_0 = 0,8$  МПа.

#### Решение:

1. Параметры фильтров наиболее применяемых диаметров: 5, 6, 8, 10, 12 дюймов возьмем из таблицы 23 [9].
2. По графику (рисунок 3.3, [10]) принимаем значения второго предельного давления  $p_{II}$  для образования в закольматированной зоне сквозных трещин. Для фильтров 5, 6, 8 дюймов принимаем  $p_{II} = \Delta p_{уд} = 7,7$  МПа, а для фильтров диаметром 10 и 12 дюймов-  $p_{II} =$

$\Delta p_{уд} = 9,2 \text{ МПа}$ . Тогда согласно (6) необходимые начальные давления  $p_{нач}$  в газовой полости составят:  $p_{нач} = \Delta p_{уд} + p_0$ .

Для фильтров 5, 6, 8 дюймов  $p_{нач} = 7,7 + 0,8 = 8,5 \text{ МПа}$ . Для фильтров 10 и 12 дюймов  $p_{нач} = 9,2 + 0,8 = 10 \text{ МПа}$ .

2. Акустический КПД определим по таблице 1 для принятого диапазона соотношений  $p_{нач}/p_0 = 10,6 - 12,5$  и  $k = 1,4$ . Акустический КПД равен  $\eta_a \approx 4\%$ . Гидравлический КПД примем согласно расчетов по формуле (16) равным  $\eta_r = 0,085$ ,  $\kappa_s$  – коэффициент использования энергии примем таким же, как и для парового пузыря, образующегося при электрогидравлическом разряде,  $\kappa_s = 0,15$  [11]. Соотношение  $V_{1,п}/V_{2,п}$  примем приближенно 0,8.

Расчеты  $V_{нач}$  произведем по формуле (17). Необходимое количество жидкого азота для обработки 1 м.п. фильтра определяем исходя из того, что при испарении 1 л жидкого азота плотностью  $\rho_N = 808 \text{ кг/м}^3$ , образуется 650 л газа при Н.У. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2- Результаты расчетов запасаемой энергии в камере для декольматации 1 м.п. фильтров

Типо- размер фильтра	$f_{пр}, \text{ м}^2$	$S,$ м	$r_{в}, \text{ м}$	$h',$ м	$c,$ м/с	$p_{нач},$ МПа	$V_{нач},$ дм <sup>3</sup>	$E_{нач},$ кДж	$V_{жс}$ на 1 м.п., дм <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11
СП-5Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,087	0,18	1239	8,5	0,1	2,1	0,1
СП-6Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,098	0,2	1219	8,5	0,5	10,6	0,4
СП-8Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,124	0,25	1178	8,5	1,1	23,4	0,6
СП-10Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,151	0,3	1168	10,0	1,9	47,5	1,0
СП-12Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,177	0,35	1131	10,0	3,4	85	1,5

## Выводы

1. Рассмотрены физические основы применения жидкого азота для регенерации фильтров скважин.
2. Определены удельные энергозатраты декольматации фильтров скважин с помощью жидкого азота.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ регенерации фильтров водозаборных скважин: а.с. 1301945 СССР, МКИ А1 Е03В3/15, Е21В 37/00 В.В. Ивашечкин, А.Н. Кондратович, Б.В. Сабадах, Н.П. Матвейко; Белорус. политехн. ин-т.-№ 3974476/29-33; заявл. 10.11.85; опубл. 07.04.87// Открытия. Изобрет.-1987. – № 13.
2. Способ регенерации фильтров водозаборных скважин: а.с. 1578284 СССР, МКИ А1 Е03В3/15 / В.В. Ивашечкин, В.С. Алексеев, Д.А. Козлов, В.Т. Гребенников, В.Т. Малишевский; Белорус. политехн. ин-т.-№ 4417946/23-33; заявл. 28.04.88; опубл.15.07.90// Открытия. Изобрет., 1990. – № 26.
3. Импульсно-криогенный способ восстановления пропускной способности фильтров скважин: Отчет о НИР (заключ.) / Белорус. политех. ин.-т; рук. темы Д.А. Козлов. – Минск, 1989. – 67с.
4. Устройство для импульсно-реагентной очистки скважинного фильтра: а.с. 1641982 СССР, МКИ А1 Е21В37/02 / Д.А. Козлов, В.В. Ивашечкин, В.С. Алексеев, М.Ю. Стриганова, И.А. Герасименко; Белорус. политехн. ин-т.-№ 4436160/03; заявл. 03.06.88; опубл.15.04.91// Открытия. Изобрет, 1991. – № 14.
5. Андреев, К.Н. Пневмореагентная регенерация скважин на воду: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / К.Н. Андреев. – Москва, 1990. – 23 с.
6. Степанов, В.Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов/ В.Г. Степанов, И.А. Шавров// Л.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
7. Ивашечкин, В.В. Расчет энергозатрат при газоимпульсной регенерации фильтров водозаборных скважин//Энергетика– Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2004, № 1. – С. 77-86.

8. Балашканд, М.И. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях/ М.И. Балашканд, С.А. Ловля. – М.: Недра, 1977. – 150 с.

9. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин/ В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев.–3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.

10. Ивашечкин, В. В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения: монография /В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 259 с.

11. Рябинин А.Г., Мертенс К.К., Мамутов В.С., Вагин В.А. Об оптимизации формы разрядной камеры при электрогидроимпульсной штамповке / Высокоскоростная обработка материалов давлением: тр. ХАИ. 1982, вып. 8. – С. 120-125.

*УДК 628.112*

В.В. Ивашечкин (БНТУ)

## **РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН ВЗРЫВОМ ХЛОРВОДОРОДНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ**

**Вводная часть.** Способ регенерации фильтров взрывом водородно-кислородной газовой смеси (ВКГС) в скважине экологически безопасен и обладает значительными энергетическими возможностями: при полном сгорании  $1 \text{ дм}^3$  смеси выделяется  $7,1 \text{ кДж}$  энергии. Продуктом взрыва здесь является водяной пар, поэтому для последующей или одновременной реагентной обработки разрушенных отложений используют специальные реагенты.

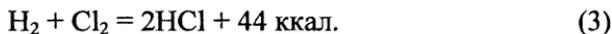
Определенный интерес представляет использование для регенерации фильтров скважин взрыва хлор-водородной газовой смеси (ХВГС), получаемой электролизом хлорида натрия [1-3]. Продуктом взрыва является хлористый водород, который растворяясь в воде, образует раствор реагента - соляной кислоты. И хотя энергетические возможности этого способа в  $1,7$  раза меньше, чем у водородно-кислородной газовой смеси (при сжигании  $1 \text{ дм}^3$  смеси выделяется  $4,17 \text{ кДж}$  энергии), он обеспечивает возможность одновре-

менного импульсно-реагентного воздействия на отложения. Получаемый электролизом хлорида натрия, раствор гипохлорита натрия является хорошим дезинфектантом [4].

**Основная часть.** Физические основы использования хлорводородной газовой смеси для регенерации водозаборных скважин. Реакция взаимодействия водорода с хлором относится к классу цепных реакций, в которой цепной процесс происходит в результате последовательного чередования реакций с участием активных центров: атомарного водорода и атомарного хлора, попеременно образующихся на очередных звеньях цепи в элементарных реакциях [5]:



Суммарное уравнение реакции имеет вид



Из уравнения следует, что из двух объемов водорода и хлора образуется 2 объема продуктов реакции, т.е. реакция идет без изменения объема, в то время как реакция горения водорода идет с уменьшением объема: из трех объемов газов ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) получается только 2 объема продуктов ( $2\text{H}_2\text{O}$ ), что указывает на некоторые преимущества реакции (3).

Предельная глубина воды в скважине для осуществления взрыва смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  ограничена возможностью конденсации паров хлора с увеличением давления и снижением температуры. Связь температуры  $T$  (градусы Кельвина) и давления  $p$  (атм), при которых возможна конденсация хлора, выражается следующей формулой  $p = (T/200)^7$ . Подстановка в формулу температуры, характерной для скважин,  $T = 283 \text{ K}$ , позволяет определить давление начала конденсации хлора  $p = 11,3 \text{ атм}$ , что эквивалентно глубине воды  $H = 113 \text{ м}$ . Это указывает на некоторые ограничения применения смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  по глубине. Хотя этот диапазон глубин перекрывает пьезометрические напоры в скважинах, каптирующих воду из большинства четвертичных и неглубоко залегающих отложений среднего девона.

Для сравнения следует отметить, что ограничение по глубине применения смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  соответствует глубине  $H = 18000$  м, так как на этой глубине газовая смесь за счет сжатия превращается в жидкость.

Взрывоопасность хлор-водородной смеси определяется пределами взрываемости  $\pi_{\min}$  и  $\pi_{\max}$  по содержанию водорода  $\text{H}_2$  в исходной смеси. Пределы взрываемости определены экспериментально многими исследователями. Их данные несколько отличаются друг от друга. Хикито и Урано [6] в вертикальной трубе диаметром 4 см получили  $\pi_{\min} = 6\%$   $\text{H}_2$  при поджигании смеси у нижнего конца трубы и  $11\%$   $\text{H}_2$  при поджигании у верхнего конца трубы. Линдейер [7] для трубы диаметром  $d = 1,5$  см получил значения  $\pi_{\min} = 10,4\%$   $\text{H}_2$  и  $\pi_{\max} = 83,9\%$ . В.Н. Антонов, Ю.Е. Фролов и др. [8] определяли давление при центральном зажигании в сферической бомбе диаметром  $d = 15,6$  см, изготовленной из нержавеющей стали. Значение  $\pi_{\min}$  составило (5-6) %  $\text{H}_2$  при исходных давлениях (1-3) атм. Стебенев А.В. и др. [9] определили пределы взрывобезопасности хлор-водородной смеси при нормальных условиях при зажигании у закрытого конца как 10 и 85 % в трубе диаметром 50 мм, а в более узкой трубе диаметром 32 мм этот диапазон сокращался до 15-80 %.

Отсюда следует вывод о том, что хлорводородные смеси не имеют четко выраженных пределов взрываемости. При поджиге в верхней части труб, заполненных смесью, нижний предел взрываемости составляет около 11 %, а верхний предел – около 84 %.

Реакция (3) может происходить в режиме горения и детонации.

Детонация Детонация смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  изучалась А.С. Соколицом и К.С. Щелкиным [10], которые экспериментально определили скорость фронта детонационной волны –  $D = 1741$  м/с.

Я.Б. Зельдович и С.Б. Ратнер [11] теоретически рассчитали скорость детонационной волны для смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  на основе закона сохранения энергии для сильных ударных волн в идеальном газе ( $p_{уд} \gg p_0$ ). Приведенные в [11] расчетные данные параметров состояния продуктов детонации в точке Жуге при показателе адиабаты Пуассона  $k=1,24$  для начального давления  $p_0 = 760$  мм рт. ст. (1 атм) представлены в таблице 1

Как указано в [11], вследствие высокой температуры в зоне реакции, возможна диссоциация хлористого водорода и образование атомарного хлора  $2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{Cl}$ . Ниже приведены (см. таблицу 2)

расчетные равновесные составы продуктов при температуре детонации для начального давления  $p_0 = 760$  мм рт. ст.

Таблица 1 – Расчетные параметры состояния продуктов детонации смеси  $H_2 + Cl_2$  в точке Жуге [11]

Исходный состав	Давление $p_{н}$ , атм	Температура $T_{н}$ , К	Скорость детонационной волны $D$ , м/с
$H_2 + Cl_2$	21,1	3130	1720

Таблица 2 – Расчетные параметры состава продуктов детонации смеси  $H_2 + Cl_2$  в точке Жуге [11]

Температура $T_{н}$ , К	HCl	$H_2$	$Cl_2$	Cl	H
3130	80,11	5,74	0,2	12,51	1,44

Гидродинамические параметры стационарной ударной волны при детонации смеси  $H_2 + Cl_2$  можно рассчитать по известным зависимостям [12]. Согласно уравнению (3) плотность  $\rho_0$  смеси  $H_2 + Cl_2$  при нормальных условиях и удельная теплота  $Q$  взрывного превращения соответственно равны:

$$\rho_0 = \frac{0,0729 \text{ кг}}{0,0448 \text{ м}^3} = 1,627 \text{ кг/м}^3,$$

$$Q = \frac{184184 \text{ Дж}}{0,0729 \text{ кг}} = 2,527 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Используя данные таблицы 1 и известные формулы [12] для смеси  $H_2 + Cl_2$  при  $p_0 = 105$  Па,  $T_0 = 273$  К,  $\rho_0 = 1,627$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 2,527$  МДж/кг,  $k = 1,24$ , принимаем, что давление в точке Жуге  $p_n = 21,1 \cdot 105$  Па, давление на фронте ударной волны  $p_{уд} = 2p_n = 42,2 \cdot 10^5$  Па. Тогда

давление продуктов взрыва в замкнутом объеме при детонации

$$p_{\text{взр}} = \frac{P_{\text{н}}}{2} \approx 10,5 \cdot 10^5 \text{ Па}. \text{ Отсюда следует, что}$$

$$p_{\text{взр}} = \frac{P_{\text{н}}}{2} \approx 10,5 p_0. \quad (4)$$

Следовательно степень увеличения давления для смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  равна  $m = p_{\text{взр}}/p_0 \approx 10,5$ .

С ростом глубины  $H$ , на которой производится подводный взрыв смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ , давление взрыва возрастает пропорционально возрастающей плотности  $\rho_0^{\text{н}}$  исходной газовой смеси. Плотность  $\rho_0^{\text{н}}$  смеси на глубине  $H$  можно рассчитать, зная плотность  $\rho_0$  смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  при нормальных условиях.

В дальнейшем, для расчета пульсаций продуктов детонации смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ , можно использовать гипотезу «мгновенной детонации» [12] и принимать начальное давление в продуктах взрыва перед расширением равным  $p_{\text{взр}}$ .

Детонацию можно получить при поджигании горючей газовой смеси, в трубе у закрытого конца [13]. Здесь происходит расширение газа. Пламя действует как поршень: продукты сгорания занимают больший объем, чем первоначальный объем холодного горючего газа, толкают по трубе холодный газ. Поршень вызывает повышение давления в газе, которое распространяется со скоростью звука в невозмущенном газе. Фронт пламени ускоряется, генерируются волны сжатия, распространяются по несгоревшему газу. Все волны сжатия соединяются в одну ударную волну, которая нагревает вещество и начинает интенсивно идти реакция горения. Образуется детонационная волна, происходит разгон горения до высоких скоростей. Этот процесс изучался в работе [9]. Авторы исследовали сгорание смесей  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  различного состава в вертикальных трубах диаметром 32 и 50 мм и длиной 1,5 м при нормальных начальных условиях.

**Взрывное горение.** Если процесс взрывного горения смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  происходит в камере с замкнутым постоянным объемом при отсутствии теплообмена с окружающей средой, то давление в ней по мере протекания реакции повышается и может достигнуть максималь-

ной величины, называемой равновесным давлением адиабатического сгорания  $p_{\text{взр.г}}$ , приближенно определяемой по формуле термодинамики для изохорического процесса [14]

$$p_{\text{взр.г}} = \eta p_0 \frac{T}{T_0}, \quad (5)$$

где  $p_0$  – начальное давление исходной газовой смеси;  $T_0$  – начальная температура газовой смеси, К;  $T$  – температура продуктов взрывного горения, К;  $\eta$  – множитель, учитывающий, что из одного моля исходной газовой смеси образуется  $\eta$  молей продуктов сгорания.

Для стехиометрической смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  принимаем  $\eta = 1$ ,  $T = 3000$  К (при допущении о режиме полного торможения диссоциации [14]),  $T_0 = 300$  К и получаем десятикратное повышение давление в замкнутой камере при горении, т.е.

$$p_{\text{взр.г}} = 10 p_0. \quad (6)$$

Степень возрастания давления в замкнутом объеме у смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  при горении  $m = p_{\text{взр.г}} / p_0 = 10$ .

Для смеси 30 %  $\text{H}_2 + 70$  %  $\text{Cl}_2$  величина  $m = 8$  [9]. Для смесей, содержащих не более 10% водорода, рост давления в замкнутом объеме составляет 2,1-3,3 [8]. Следовательно, наибольший рост давления при сгорании в замкнутом объеме имеет место для смеси стехиометрического состава 1:1.

Процесс взрывного горения изучался в работе [9]. Авторы исследовали сгорание смесей  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  различного состава в вертикальных трубах диаметром 32 и 50 мм и длиной 1,5 м при нормальных начальных условиях. По длине трубы устанавливали 4-е мембранных датчика давления типа ДД-10 для измерения давления ударной волны. Датчики Д1-Д3 фиксировали изменение давления в падающей ударной волне и были установлены по образующей трубы, а датчик Д4 был установлен в торце трубы и измерял отраженную волну. Распространение зоны горения фиксировалось термопарами Т1-Т3, размещенными аналогично датчикам давления Д1-Д3.

В опытах подтверждено, что на участке 1-3 произошло ускорение пламени до скорости  $u = 500$  м/с, которая во много раз выше

нормальной скорости горения, не превышающей  $u_n = 2-3$  м/с. На всех участках между датчиками скорость горения максимальна для смеси стехиометрического состава. Получено, что на последнем участке между датчиками скорость горения в 220 раз превышала нормальную скорость у смеси стехиометрического состава. У самых медленно горящих смесей с избытком водорода (>80 %) пламя ускорилося только в 4-5 раз.

Замеры давления показали, что давление, как и скорость пламени, повсюду достигает максимального значения у смеси стехиометрического состава. Для падающей ударной волны зарегистрировано возрастание давления до десятикратного значения для смеси стехиометрического состава, а для отраженной - до трехкратного значения по сравнению с падающей.

Перегретый хлористый водород образует в жидкости газовую полость высокого давления, которая совершает ряд затухающих пульсаций. При этом потенциальная энергия продуктов взрыва переходит в энергию волн сжатия и кинетическую энергию гидропотока. В процессе пульсаций происходит растворение продуктов взрыва.

Степень растворения хлористого водорода зависит от глубины обработки и может достигать 450 объемов на один объем воды. Образуемая соляная кислота обеспечивает дополнительное реагентное воздействие на кольматирующие отложения. При растворении в скважинной воде остатков хлора, не прореагировавшего в ходе реакции (1) образуется раствор активного хлора, позволяющий производить хлорирование фильтра и прифилтровой зоны.

Таким образом, преимущества ХВГС заключаются в возможности проведения комбинированной импульсно-реагентной обработки скважины с одновременным хлорированием. Подобный вариант обработки фильтров скважин предпочтителен при наличии процессов биологического кольматажа.

Расчет энергозатрат для декольматации фильтров с помощью взрыва ХВГС. Известно, что осуществление газоимпульсной обработки фильтра в запакованном интервале позволяет наиболее эффективно использовать энергию взрыва газообразного энергоносителя для разрушения кольматирующих отложений. Поэтому расчет необходимых энергозатрат для декольматации фильтров с помощью

ХВГС произведем по методике, изложенной в работе [15], используя те же допущения.

Пусть взрывную камеру заполнили стехиометрической газовой смесью  $H_2 + Cl_2$ , в которой инициировали взрыв. Начальное давление в продуктах взрыва перед расширением рассчитываем по формулам (4) и (6), в зависимости от вида химического превращения.

**Пример:** определить необходимое количество стехиометрической смеси  $H_2 + Cl_2$  для создания сквозных трещин в закольматированной обсыпке при импульсной декольматации 1 м.п. каркасно-стержневых фильтров с проволочной навивкой, технические характеристики которых представлены в таблице 23 [16]. Если  $\delta = 0,06$  м, кубиковая прочность сцементированного гравия  $\bar{R}_{с.г.} = 2$  МПа, сопротивление растяжению  $R_{с.г.} = 0,37$  МПа,  $E_{с.г.} = 15000$  МПа. Проволочная навивка – сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) с модулем упругости  $E_{пр} = 240000$  МПа. Просвет проволочной навивки  $t = 2,5$  мм. Глубина обработки  $H = 90$  м, которой соответствует давление  $p_0 = 1$  МПа.

**Решение:**

1. Параметры фильтров наиболее применяемых диаметров: 5, 6, 8, 10, 12 дюймов возьмем из таблицы 23 [16].

2. Примем режим химического превращения - детонацию. Согласно выражению (4) начальное давление в продуктах взрыва составит

$$p_{взр} \approx 10,6 p_0 = 10,6 \cdot 1 = 10,6 \text{ МПа} .$$

Давление на фронте волны давления в полости фильтра будет равно  $\Delta p_{уд} = p_{взр} - p_0 = 10,6 - 1 = 9,6$  МПа. Выполняем проверку достаточности величины  $\Delta p_{уд}$  для образования в закольматированной обсыпке при взрыве ХВГС сквозных трещин. Сравнение величины  $\Delta p_{уд}$  с величинами второго предельного давления  $p_{II}$  показывает, что для всех диаметров фильтров выполняется соотношение  $\Delta p_{уд} > p_{взр}$ , следовательно в закольматированной обсыпке будут образовываться сквозные трещины.

3. Акустический и гидравлический КПД примем такими же, как у смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ , учитывая одинаковые значения степеней роста  $m$  давления после взрыва и близкие значения коэффициентов адиабаты:  $k = 1,21$  у смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  и  $k = 1,24$  у смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ . Тогда  $\eta_a \approx 0,002$ ,  $\eta_r = 0,05$ ,  $k_3 = 0,15$ . Соотношение  $V_{1.п.}/V_{2.п.}$  примем приближенно равным 0,8.

Результаты расчетов объема ХВГС в камере  $V_{0.п.}$  приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов запасаемой энергии в камере для декольматации 1 м.п. фильтров взрывом смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$

Типо-размер фильтра	$f_{пр,2}$ м <sup>2</sup>	S, м	$r_{в,}$ м	$h',$ м	c, м/с	$V_{0.п.},$ дм <sup>3</sup>	$V_{0.п.},$ при Н.У. дм <sup>3</sup>	$V_{0.п.},$ при Н.У. на 1 м.п., дм <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	8	9	11
СП-5Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,087	0,035	1239	0,2	2	57
СП-6Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,098	0,04	1219	0,3	3	76
СП-8Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,124	0,055	1178	0,8	8	142
СП-10Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,151	0,07	1168	1,2	12	171
СП-12Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,177	0,08	1131	2,1	21	263

## Выводы

1. На основании аналитического обзора литературных источников рассмотрены энергетические возможности хлор-водородной газовой смеси при двух режимах химического превращения: взрывном горении и детонации. Преимущества ХВГС заключаются в возможности проведения комбинированной импульсно-реагентной обработки скважины с одновременным хлорированием.

2. Выполнены расчеты необходимых энергозатрат для декольматации фильтров скважин с помощью взрывов ХВГС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ регенерации водозаборной скважины: а.с. 1768722 СССР. /А.Д. Гуринович, В.Н. Ануфриев, В.В. Ивашечкин: Белор. политех. инс-т., 4426835/33; заявл. 31.07.89; опубл. 15.10.92. – Открытия. Изобрет., 1992. – № 38.
2. Устройство для регенерации фильтров скважин: а.с. 1512194 А1 СССР; МКИ E03B3/15, E21B 37/00 /А.Д. Гуринович, В.В. Ивашечкин, В.Н. Ануфриев, Б.В. Сабадах и Л.С. Ивашечкина; Белор. политехн. ин-т, № 4320394/23-33; заявл. 27.10.87; не публик.
3. Ануфриев В.Н. Технология обработки скважин хлорсодержащими реагентами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / В.Н. Ануфриев. – Минск, 1999. – 29 с.
4. Ануфриев, В.Н. Исследование анодных покрытий титановых электродов при получении гипохлорита натрия электролизом водных растворов хлорида натрия/В.Н. Ануфриев, В.В. Ивашечкин, Е.А. Новиков, В.Б. Буссе-Мачукас// Энергетика - Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 1992, № 7-8. – С. 75-81.
5. Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н.Семенов. – М.: Госхимтехиздат, 1934. – 156 с.
6. Hikita, T., Urano T. /J. Chem. Soc. Japan, 1957, v. 60, – P. 48-56.
7. Lindeijer E. W. Rec. Travaux chim. Pays Bas, 1937, v. 56, – P. 97-103.
8. Антонов, В.Н. Взрывоопасность смесей водорода с хлором / В.Н. Антонов, А.И. Розловский, А.С. Мальцева // Химическая промышленность. 1974, № 3, – С. 205-208.
9. Стеблев, А.В. Закономерности сгорания хлор-водородных смесей в трубах/ А.В. Стеблев, А.С. Мальцева, А.И. Розловский, Ю.Е. Фролов// Химическая промышленность. – 1976. – № 2. – С. 135-138.
10. Соколик, А.С. Детонация в газовых смесях. Изменение скорости детонационной волны с давлением/ А.С. Соколик, К.И. Щелкин // Журн. Физ. Химии.- 1934, т. 5, – С. 1459-1464.
11. Зельдович, Я.Б. Расчет скорости детонации в газах / Я.Б. Зельдович, С.Б. Ратнер// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1941. – т. 11, вып. № 1. – С.170-183.
12. Физика взрыва / Ф.А. Баум [и др.]. – М: Наука, 1975. – 704 с.

13. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

14. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами/А.И. Розловский. – М.: Химия, 1980. – 376 с.

15. Ивашечкин, В.В. Расчет энергозатрат при газоимпульсной регенерации фильтров водозаборных скважин// Энергетика–Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2004. – № 1. – С. 77-86.

16. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин/ В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.

*УДК 628.15*

Т.В. Козицин (БНТУ)

## **СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

Затраты на строительство и эксплуатацию водопроводных сетей составляют одну из наиболее важных статей расходов в целом по всей системе водоснабжения, и отклонение при проектировании от оптимального варианта сети приводит к значительному перерасходу средств. Поэтому очевидность подробного технико-экономического расчета не должна вызывать ни у кого сомнения. Однако в настоящее время на практике получил широкое распространение приближенный метод определения диаметров труб участков сети по так называемым «средним экономическим скоростям». В связи с этим было принято решение провести исследование, с целью определить к чему же приводит такой подход при проектировании.

Сравнение существующих методов расчета производилось на условной модельной сети, в которой для большей наглядности и упрощения расчетов отсутствовали конструктивные участки (рисунок 1). Узловые отборы были приняты фиксированными и равными во всех узлах сети.

Сначала нами была рассчитана сеть по методу «средних экономических скоростей». Расчет производится в следующей последовательности:

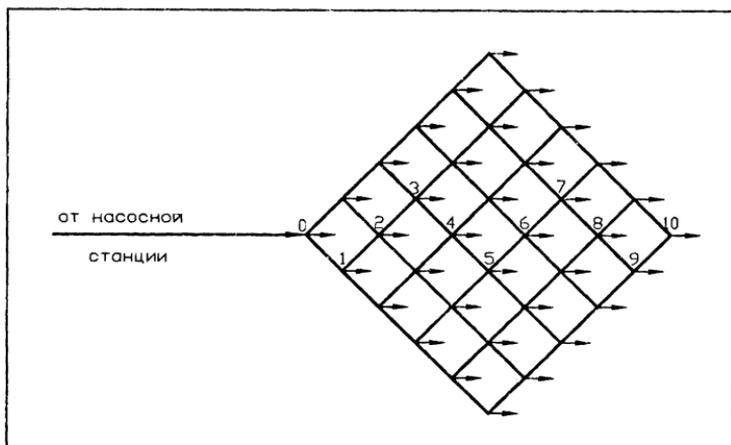


Рисунок 1 – Условная модельная сеть

1. Устанавливается желаемое распределение потоков по сети, т.е. определяются величины расчетных расходов  $q_i$  для всех линий с соблюдением баланса расходов в узлах:

$$\sum q_i = 0. \quad (1)$$

2. Назначаются диаметры участков сети по таблицам для гидравлического расчета трубопроводов [1] в соответствии со значениями расчетных расходов  $q_i$ .

Описанный метод основан на допущении, что участки водопроводной сети являются независимо работающими трубопроводами. Чтобы разобраться в сущности сделанного допущения, рассмотрим его работу.

Затраты энергии при транспортировании воды с расходом  $q$  по независимо работающему трубопроводу выражаются следующей зависимостью:

$$N = \frac{q \cdot h}{102 \cdot \eta}, \quad (2)$$

где  $h$  - потери напора;

$\eta$  - КПД насосных агрегатов.

Потери напора можно выразить для квадратичной зоны сопротивления следующим образом:

$$h = S \cdot q^2, \quad (3)$$

где  $S$  - фиктивное сопротивление трубопровода.

С учетом выражения (3) формула (2) будет выглядеть следующим образом:

$$N = \frac{S}{102 \cdot \eta} \cdot q^3. \quad (4)$$

Теперь рассмотрим трубопровод с попутными отборами (рисунок 2).

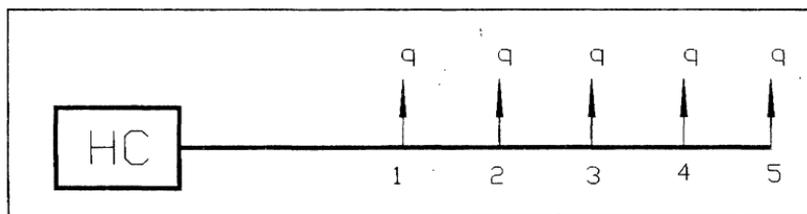


Рисунок 2 – Трубопровод с попутными расходами

В показанном случае участки 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 являются зависимо работающими трубопроводами. Затраты энергии на транспортировку расхода  $q_i$  по таким участкам можно выразить следующим образом:

$$N = \frac{Q_{НС} \cdot h}{102 \cdot \eta}, \quad (5)$$

где  $Q_{НС}$  - расход воды, подаваемый от насосной станции.

С учетом (3) выражение (5) будет выглядеть:

$$N = \frac{S}{102 \cdot \eta} \cdot Q_{НС} \cdot q_i^2. \quad (6)$$

Как видно из сопоставления зависимостей (3) и (6), при пропуске одного и того же расхода по независимо работающему трубопроводу и зависимо работающему участку равных диаметров затраты энергии в последнем случае всегда больше. Причем разница будет во столько раз больше, во сколько раз  $Q_{НС}$  больше  $q_i$ . Поэтому для конечных участков трубопровода (рисунок 2), для которых соотношение  $Q_{НС}/q_i$  является достаточно большим, следует назна-

чать несколько большие диаметры по сравнению с тем, что требует метод «средних экономических скоростей». При определении диаметров зависимо работающих участков можно пользоваться теми же таблицами предельных экономических расходов [1], составленных для независимо работающих трубопроводов. Однако назначать диаметры нужно не по расчетным расходам  $q_i$ , а по так называемым приведенным расходам  $q_{np.i}$ .

Приведенный расход  $q_{np}$  — это расход, при пропуске которого по независимо работающему участку затраты энергии на преодоления потерь напора равны затратам энергии при пропуске расхода  $q$  по зависимо работающему трубопроводу такого же диаметра. Используя это определение, приравняем выражения (3) и (6). В результате получим:

$$q_{np}^3 = Q_{НС} \cdot q^2. \quad (7)$$

Путем несложных преобразований получаем:

$$q_{np} = q \cdot \sqrt[3]{\frac{Q_{НС}}{q}}. \quad (8)$$

Пусть  $K = \sqrt[3]{\frac{Q_{НС}}{q}}$ , тогда выражение (9) будет выглядеть:

$$q_{np} = q \cdot K. \quad (9)$$

Коэффициент  $K$  называется коэффициентом приведения.

В водопроводных кольцевых сетях всегда можно выделить магистральные и конструктивные участки. Для последних диаметры на-

значаются исходя из соображений надежности. Магистральные направления в сетях можно рассматривать, как совокупность зависимо работающих трубопроводов, подобных тому, что изображено на рисунке 2. При таком подходе можно использовать метод подбора диаметров, описанный выше. Различие будет состоять в том, что коэффициент приведения  $K$  будет определяться не для каждого участка, а для совокупности участков, попадающих в расчетное сечение (рисунок 3).

Для сети на рисунке 3 формула коэффициента приведения следующая:

$$K_i = \sqrt[3]{\frac{Q_{НС}}{\sum q_j}}, \quad (10)$$

где  $\sum q_j$  -- сумма расходов, проходящих через расчетное сечение.

Для сети взятой нами для анализа в начале статьи расчетные сечения пройдут, как показано на рисунке 4.

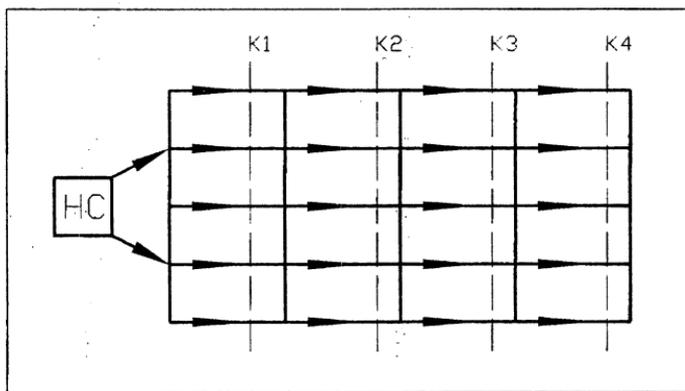


Рисунок 3 – Водопроводная сеть и расчетные сечения

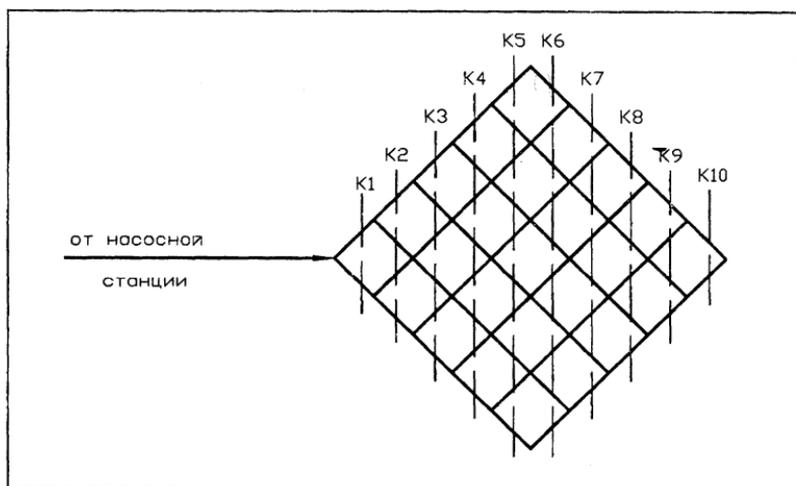


Рисунок 4 – Модельная сеть с расчетными сечениями

Описанный метод расчета водопроводных сетей был предложен доц. Седлуха С.П. Метод дает хорошие результаты, когда участки в расчетном сечении отличаются незначительно по длине и пропускаемому расходу, а также, если нет особых местных условий (что выполняется для нашей сети). В противном случае необходимо применять более подробные методы расчета [2, 3].

Сравним теперь два варианта сети (рисунок 1.) рассчитанных по методу «средних экономических скоростей» и по методу Седлуха С.П.

Для оценки оптимальности сетей использовался признак минимума приведенных затрат на строительство и эксплуатацию в течение расчетного срока эксплуатации. Разновременные затраты при этом приводились к одному моменту времени. Капитальные затраты и эксплуатационные расходы определялись по фактическим ценам на апрель 2000г.

В результате расчетов приведенные затраты на строительство и эксплуатацию по методу С.П. Седлуха оказались на 10 % меньше, чем по методу «средних экономических скоростей» (таблица 1).

Также, для большей наглядности, были проведены расчеты, целью которых было, не изменяя стоимости сети, рассчитанной по методу «средних экономических скоростей» снизить общие потери напора, и, наоборот, не изменяя потерь напора той же сети снизить

ее сметную стоимость, что и было сделано. В первом случае потери были снижены на 30 %, а во втором случае стоимость оказалась меньше на 5 % (расчеты в связи с ограниченным объемом статьи не приводятся). Хочется так же отметить, что есть практическая возможность снизить одновременно как стоимость, так и потери напора сети, рассчитанной по «средним экономическим скоростям».

Таблица 1 – Результаты расчетов сети

Принцип расчета сети	Сметная стоимость, млн. руб.	Потери напора, м	Приведенные затраты, млн. руб.
по «средним экономическим скоростям»	606.7	31.78	926.1
по методу Седлуха С.П.	650.9	16.19	831.9

Кроме того, если построить профиль пьезометрических напоров по любому пути от диктующей точки до насосной станции, например 1, 2, 3, 4, ... 10 (рисунок 1) для обеих сетей, то мы увидим, что избыточные напоры в сети меньше там, где учтена роль участков, (рисунок 5). А, следовательно, меньше и утечки, и непроизводительные расходы.

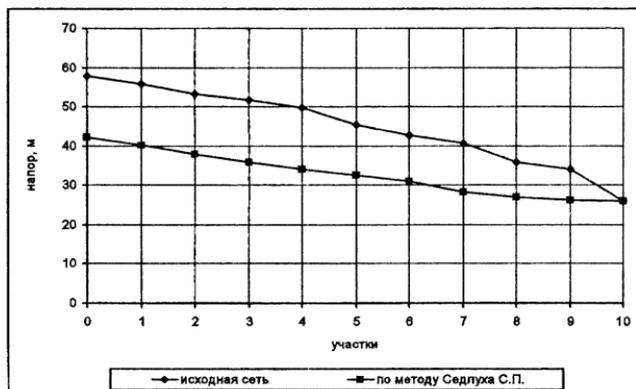


Рисунок 5 – Пьезометрические напоры

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шевелев, Ф.А., Шевелев, А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1984. – 200 с.
2. Мошнин, Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей. – М.: Стройиздат, 1950. – 144 с.
3. Кикачейшвили, Г.Е. Расчет оптимальных параметров систем подачи и распределения воды – Тбилиси: Издательство Сабчета Сакартвело, 1980. – 200 с.

*УДК 627.83*

А.В. Пахомов (Центральный НИИ комплексного использования водных ресурсов)

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ**

За последние полвека повсеместно значительно возросла интенсивность антропогенного воздействия на природные экосистемы, том числе на водные объекты.

Распашка лугов, склонов, пойм, лесозаготовительные работы приводят к развитию эрозионных процессов и переносу их продукции в водные объекты. Ухудшение состояния качества воды происходит за счет поступления в воды органики, биогенов, пестицидов, солей тяжелых металлов и других загрязнителей. Результат этого известен у большинства водных объектов Республики Беларусь превышены уровни ПДК (предельно допустимые концентрации) по многим загрязняющим веществам (соединениям азота и фосфора, пестицидам, органическим веществам).

В связи с этим, актуальными становятся вопросы применения на практике мероприятий по восстановлению и сохранению водных экосистем, повышения эффективности использования водных ресурсов. Он должны применяться системно и комплексно, с анализом структуры с/х угодий, агроклиматических характеристик, почв,

залесенности, заболоченности и мелиоративности, размещения населенных пунктов, отдельных предприятий и др.

Для системного подхода к решению проблемы качества воды для объекта выбор водоохранного мероприятия должен быть обусловлен прежде всего: видом приоритетных загрязнителей, затратами на проведение мероприятий и их эффективностью.

В ходе процесса выноса загрязняющих веществ (ЗГВ) с поверхностным стоком в водный объект выделяются три стадии: первоначальная, переходная и транзитная.

В течение первоначальной стадии содержание вещества, внесенного в экосистему, в окружающей среде достигает того предела, при котором вещество становится загрязнителем.

Переходная стадия описывает процесс трансформации загрязняющего вещества в одно из следующих состояний: в эродируемые частицы или растворенное в воде вещество.

При транзитной стадии загрязнители достигают водного объекта с поверхностным или посредством инфильтрации с грунтовым стоком.

Водоохранных мероприятия можно сгруппировать в две группы:

I. Мероприятия в результате которых снижается количество загрязняющих веществ, поступающих на водосбор с удобрениями, пестицидами от отходов животноводческого производства (первоначальная стадия).

II. Мероприятия, направленные на задержание склонового стока, снижение или прекращение миграции загрязняющих веществ в сопредельные среды (переходная и транзитные стадии).

К первой группе относятся следующие мероприятия:

1. Методика применения минеральных и органических удобрений:

- хранение минеральных и органических удобрений на закрытых площадках, в специально оборудованных для этого местах;
- запрет на внос удобрений по снежному покрову и на замерзшую почву, сокращение до минимума внесения осенью;
- нормирование (дозирование) вносимых удобрений для максимального использования их растениями и минимального выщелачивания или переноса почвенной эрозией;

– применение медленно действующих и труднорастворимых удобрений.

2. Методика применения пестицидов:

– соблюдение сроков, норм, доз и технологий внесения пестицидов;

– использование слаботоксичных пестицидов.

3. Контроль за отходами животноводства (ферм и животноводческих комплексов):

– сбор, хранение, обработка и использование загрязненных стоков для предотвращения загрязнения поверхностных и грунтовых вод;

– запрещение строительства комплексов и ферм, лагерей скота, стойбищ в поймах рек или вблизи них;

– обеспечение ферм и комплексов очистными сооружениями.

Вторая группа включает в себя следующие мероприятия:

1. Контроль за сохранением почвенного покрова: противоэрозийная организация территории (лесополосы, почвозащитные севообороты), залужение склонов, борьба с оврагами, создание дренажных водоотводящих канав и др.

2. Оконтуривание сельскохозяйственных угодий - устройство земельных рвов, насыпей по границам угодий, с целью снижения поверхностного стока и угодий.

3. Сохранение стерни – проводится в период после уборки и до подготовки к новому севу с целью снижения смыва почвы при ливневых осадках.

4. Эффективный севооборот – форма севооборота при которой происходит улучшение свойств почв угодий и их защита при эрозии.

5. Изменение структуры землепользования – изменение вида землепользования для угодья от текущего к менее используемому (менее подверженному эрозии) – с/х угодья в пастбища, неиспользуемых земель в леса.

6. Сочетание культур – сочетание в севообороте пропашных и зерновых культур и трав.

7. Залесение – высадка лесных массивов на территории водосбора, по границам полей, по берегам рек, в овражно-балочной сети.

8. Террасирование крутых склонов - устройство террас на крутых склонах, с целью снижения эрозии и уменьшения содержания взвешенных веществ в поверхностном стоке.

9. Вегетативные полосы - площадные участки, представленные лесными сообществами (сероольшаник, смешанный лес) или естественными лугами с зарослями различных видов, расположенные между потенциальными источниками загрязнения и водным объектом.

10. Создание прудов, биоплато, заболачивание территорий, прилегающих к водному объекту - эффективные водоохранные мероприятия, применяемые для удержания и снижения концентрации загрязняющих веществ, поступающих с поверхностным стоком в водный объект.

В Таблице 1 приведен анализ эффективности описанных выше водоохранных мероприятий.

Необходимо учитывать также то, что в ряде случаев комбинирование различных водоохранных мероприятий может привести к наилучшим результатам. Также не исключен вариант, при котором, решая проблему качества водного объекта, мероприятие приведет к ухудшению состояния водного объекта (перенос старого очага в новый, ускорение процессов инфильтрации биогенов или пестицидов в грунтовые воды).

В настоящее время рациональными считаются только те мероприятия, проведение которых является экологически рентабельным, удовлетворяя условию

$$E_{\text{ущерб}} - E_{\text{сум.затрат}} > 0; \quad (1)$$

где  $E_{\text{ущерб}}$  - сумма предотвращенного годового ущерба от поступления загрязняющих веществ;

$E_{\text{сум.затрат}}$  - суммарная стоимость совокупности разрабатываемых природоохранных мероприятий.

Таблица 1 – Эффективность водоохраных мероприятий

Мероприятие	Показатели качества водного объекта					
	Взвеш. в-ва	Биогены		Пестициды		Орган. соед.
		раствор.	адсорбир.	раствор.	адсорбир.	
<i>Первая группа</i>						
Методика применения удобрений	*	***	***	*	*	*
Методика применения пестицидов	*	*	*	***	***	*
Контроль за отходами животноводства	*	***	***	*	*	***
<i>Вторая группа</i>						
Контроль за сохранением почвенного покрова	***	*	***	*	***	*
Оконтуривание с/х угодий	***	**	***	**	***	**
Сохранение остатков урожая	***	*	***	*	***	*
Эффективный севооборот	***	**	***	**	***	*
Изменение землепользования	***	***	***	***	***	***
Сочетание культур	**	**	**	**	**	**
Залесение	***	**	***	**	***	**
Террасирование крутых склонов	***	**	***	**	***	**
Растительные (вегетативные) полосы	**	*	**	*	**	**
Биоплато, искусственные пруды в руслах рек, заболачивание территорий	***	**	***	**	***	***

**Примечание:** эффективность мероприятия \* - нет или низкая; \*\* от низкой до средней; \*\*\* - от средней - к высокой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Альферович, А.Н. Использование и охрана малых рек / В.В. Дрозд [и др.]. Мн.; Ураджай, 1989. – 152 с.
2. Яцухно, В.М., Мандер, Ю.Э. Формирование агроландшафтов и охрана природной среды. Минск, Институт геологических наук АНБ, 1995. – 122 с.
3. Руководство по водоохранным мероприятиям на малых реках. – Свердловск, 1985. – 36 с.
4. James F. Hairston, The rural environment and NPS pollution controlling agricultural NPS pollution through Best Management Practices. Auburn University (USA), June 1995. – 10 p.
5. Sue Nokes, Andy Ward, Surface water quality Best Management Practices Summary Guide, AEX-462-92.
6. Источник в Интернете: <http://Wvwww.ag.ohio-state.edu/ohioline/aex-fact/0464.html>.

*УДК 631.6*

П.У. Равовой (БСХА)

### **РОЛЬ А.Н. КОЗЛОВСКОГО ПО ВНЕДРЕНИЮ ДРЕНАЖА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ**

Козловский Александр Николаевич родился в 1832 году в семье обедневшего землевладельца (шляхтича) Могилевской губернии. Его отец добился от Минского дворянского собрания справки о своем дворянстве при определении сына в Минскую гимназию, которую А.Н. Козловский окончил в 1848 году. Однако утверждения в дворянстве отец в дальнейшем не получил со стороны Герольдии Правительствующего сената. (Герольдия в царской России - ведомство по делам о титулах и дворянских привилегиях). Ложное дворянство А.Н.Козловского было характерным для многих студентов-дворян Горецкого земледельческого института (ГЗИ), в особенности происходивших из шляхты. Во время учебы А.Н.Козловский по всем изучаемым в то время дисциплинам показал "весьма хорошие успехи" и в 1852 году окончил обучение в ГЗИ. С 1853 г. с целью

подготовки к научной деятельности по линии Департамента сельского хозяйства периодически находился в заграничных командировках: сначала в Германии и Бельгии, а затем в Англии. В 1856 году был переаттестован в инженеры и прикомандирован в ГЗИ для устройства дренажа. С 1860 г. преподавал сельскохозяйственную механику и архитектуру. Он также руководил агрономическими путешествиями с участием 5...6 студентов с целью непосредственного ознакомления с сельскохозяйственными условиями в Могилевской, Минской, Виленской и других губерниях. Такие агропутешествия проводились многими сотрудниками и результаты их опубликовывались в "Записках" института. Кроме публикаций в ГЗИ проводились ежегодные сельскохозяйственные съезды (1853...1857. гг), на которых ставилась цель способствовать развитию и улучшению сельского хозяйства путем обмена опытом между хозяевами. Членами съезда могли быть все помещики, управляющие именьями, агрономы.

Работа съездов оказывала некоторое влияние на деятельность института. Так, по результатам рассмотрения на съезде вопроса о дренаже Ученый Совет института принял решение устроить дренаж на своей территории. Департамент сельского хозяйства это мероприятие одобрил и в 1856г поручил А.Н. Козловскому приступить к выполнению работ.

Размах и темпы работ в институте по тем временам были приняты довольно значительные. Этот первый опыт дренажа в большом, объеме был применен для разных целей: осушения огородных земель, кислого луга, торфяных болот, кочкарных котловин на полях, осушения зданий, для укрепления откосов канала.

Закладка дренажа на площади 52 га была проведена в 1856г. на торфяных лугах фольварка Иваново в пойме р.Прони. Расстояние между дренами 21 м и глубина закладки 0,99 м обеспечивали норму осушения 0,5 м. Дренажная система здесь была устроена из горизонтальных дрен и восходящих колодцев для перехвата и снижения напора грунтовых вод. Восходящие колодцы изготовлялись из 6...7 дренажных труб большого диаметра, поставленных одна на другую и заполненных внутри трубами меньшего диаметра. Возле выходящей на поверхность трубы делали углубление, которое заполняли щебнем и камнем. Дно и стенки углубления обкладывали мхом, дерном и торфом. Таких колодцев было устроено 60. Их глубина

составляла 4 и более метров от поверхности земли. Дренаж закладывался со средним числом 380...400 погонных метров на десятину. Устья были выведены во встречные каналы, дно которых выкладывалось кирпичей. Расход воды из коллекторов составлял 3...4 л/с.

Состояние дренажа в Иваново было обследовано через 60...65 и через 100 лет его работы. При первом обследовании, проведенном профессором А.Д. Дубахом в 1921-1923 г.г. было установлено, что устья коллекторов, выведенные во встречные от водоприемника канавы оказались заиленными и заросли. Местонахождение их обнаружилось по выбивающейся в виде ключей на поверхность земли воды. Деревянные устья дренажных коллекторов и крышки смотровых колодцев легко разрушились при ударе. Дренажные трубы были свободны от отложений ила и соединений железа. Повторное обследование, выполненное в 1957-1958 г.г. Б.И.Яковлевым и В.И. Клиппертом, показало, что основная часть системы была свободна от наносов и начала действовать после восстановления устьев и очистки отдельных звеньев. Дренаж на участке "Иваново" продолжает работать и представляет большой исторический, научный и практический интерес.

Гончарный дренаж был заложен А.Н.Козловским так же для осушения связных минеральных почв с западным рельефом. Такой дренаж был устроен на Стебутовском опытном поле Горы-Горецкого земледельческого института в 1862-1863гг. на площади 12,6 га. Протяженность дренажа составила 10371 м, расстояние между дренажными линиями 13 м. Диаметр труб для осушителей принят 4 см, коллекторов - 5-8 см. Глубина закладки - 1,2 и более метров. В конструкцию дренажной системы здесь были включены поглощающие колодцы. Четыре коллектора из пяти самостоятельных систем имели устья, выведенные в канал, а одна система была устроена без устья с пятью поглощающими колодцами. Колодец выполнялся в виде ящика из пустотелого кирпича, перекрытого дренажными трубами.

При обследовании системы на Стебутовском опытном поле, проведенном под руководством А.Д. Дубаха летом 1922 г., установлено, что грунт дренажной засыпки за 60 лет сохранился более рыхлым по сравнению с нетронутым по соседству с дренажем. Вода в

дренах отсутствовала, отложение наносов составило  $-\frac{1}{4}$  до  $\frac{3}{4}$

диаметра. В поглощающих колодцах воды также не было. Изменение высотного положения дрена в западине за 60 лет не произошло. Отсутствие воды в дренах и смотровых колодцах объясняется тем, что обследование системы проводилось в сухой период года.

В 1859 г. был заложен опыт дренирования болотных котловин, которые располагались среди старопахотных полей. В центре замкнутого микропонижения устраивали колодец, стенки которого выкладывали из гончарных труб. В колодец выводили осушительные дрена. Вокруг него укладывали мох и щебень, выполнявшие роль фильтра. Так было осушено 3 котловины.

В институте были проведены успешные работы по дренированию здания. В 1854 г. здесь было построено двухэтажное здание с подвалом для технической лаборатории. Однако, уже в первую весну из-за большой сырости кирпичные полы в подвале вспучило, каменные устои, сделанные под оборудование, наклонились, часть из них упала. В некоторых местах пола начали бить ключи. Осенью 1855 г. была проведена внутренняя осушка здания. Внутри него был вырыт колодец, в который было положено две собирательные и шесть всасывающих труб. Из колодца выходила труба для сброса воды в речку. На втором этапе осушки в 1857 г. была заложена нагорно-ловчая дрена, и вода в подвальном колодце исчезла.

Под руководством А.Н.Козловского было проведено дренирование откоса канала, который сильно повреждался в результате выклинивания грунтовой воды со стороны прилегающего склона. Для осушения откоса между каналом и возвышением местности была проложена дрена, которая полностью осушила и закрепила откос.

Дренаж в дальнейшем стал распространяться в других местах Беларуси. Этот прогрессивный метод осушения заболоченных земель был применен в имении Поречье Пинского уезда, которое принадлежало А.А. Скимундту, Стоимость строительства дренажа составляла 95 руб. за каждую десятину. В имении Щорсы Новогрудского уезда, которое принадлежало графу Хрептовичу, в 1879 г. действовал завод дренажных труб.

Кроме гончарного дренажа проводились также опыты по устройству других его видов. Так, в 1854 г. был устроен каменный дре-

наж путем засыпки канав мелким бульжником. Однако данное мероприятие оказалось дорогим и несовершенным.

Ко второй половине XIX в. относятся первые попытки строительства на территории Беларуси оросительных систем. Министерство государственного имущества в специальных письмах от 26 августа 1860 г и от 14 ноября 1861 г. признало необходимым устроить при Горы-Горецком земледельческом институте искусственное орошение, чтобы студенты приобрели практические навыки по его строительству, а земледельцы смогли убедиться в его пользе. Для ирригации были выбраны два места: верхняя часть дреналогического питомника института и луг вдоль реки Поросицы. Составление проектов и смет по орошению земель было поручено профессору А.Н. Козловскому, который в одном из вариантов предложил использовать насос с гутаперченными рукавами.

Кроме строительства дренажа и обучения студентов А.Н. Козловский принимал участие в общественной жизни института.

Значительное место в общественной жизни Горецкого земледельческого института занимал студенческо-профессорский клуб. В клубе по инициативе профессора А.Н.Козловского и при участии профессоров И. Стебута и А. Гинцеля, а также студентов был предложен проект организации Могилевского земледельческого общества. По обществу был разработан проект устава и проведен съезд в Горках, на котором был рассмотрен проект устава и решено созвать в Могилеве съезд представителей уездов с материалами и положениями по организации земледельческого общества.

Однако съезд в Могилеве не состоялся, так как полиция раскрыла сепаратистскую программу, доставленную к съезду помещиками Рогачевского уезда (открытие Виленского университета, пользование польским языком и другие предложения программы). Об этом сообщил - в сентябре 1861 г. могилевский губернатор Беклемишев министру внутренних дел П.А. Валуеву. П.А.Валуев предложил министру государственных имуществ Муравьеву "сделать зависящее распоряжение к отклонению образования агрономического общества в Могилевской губернии и к обузданию своеволия студентов Горецкого института". Студентам запрещались всякого рода многочисленные собрания, кроме особого разрешения. В то же время студенты собирались как в своих частных квартирах, так и в квартирах некоторых преподавателей, в том числе и у А.Н. Козловского.

Во время собраний происходили беседы и споры по политическим вопросам. О собраниях в своей квартире А.Н.Козловский в показаниях следователю в связи с революционными событиями в институте сообщал: "У меня собирались товарищи и знакомые исключительно для препровождения времени самым невинным образом - в чтении, беседе, музыке, игре - при этом никаких других целей и намерений не преследовалось". Козловский А.Н. в своем показании скрыл, что в беседах завязывались и политические споры о реформе 1861 г., о начинавшейся польской национально-освободительной борьбе.

Кроме А.Н.Козловского под следствием оказались ещё 4 институтских преподавателя. Раскрыв студенческий революционный комитет, суд в 1864 г. обвинил, кроме учащихся, администрацию и преподавателей ГЗИ в слабости надзора и приговорил 5 преподавателей в том смысле и А.Н. Козловского к высылке из Белоруссии в восточные губернии. Профессор А.Н. Козловский после шести лет пребывания в Таврической губернии в качестве агронома-инженера по обводнительным и другим работам в 1869 г. выступал в Петербурге со статьями в "Трудах ВЭО" и с большим докладом на заседании ВЭО "о почвообработке". Из-за причастности в 1863 г. к революционным событиям в Горках А.Н. Козловский не успел защитить диссертацию до высылки. Однако вклад его в науку и мелиоративную практику к тому времени был значительным. К сожалению биографических сведений о дальнейшей после 1869 г. жизни и деятельности А.Н. Козловского пока обнаружить не удалось.

Как видим из имеющихся материалов А.Н. Козловский был первым, под чьим руководством на территории Белоруссии проведены осушительные работы с применением дренажа на значительных площадях и для разных целей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козловский, А.Н. Дренажные работы в Горы-Горецкий учебных заведениях // Журнал Министерства государственных имуществ – Спб.: 1860.
2. Равовой, П.У., Сучков, К.П. Введение в специальность: история развития мелиорации в Беларуси. – Минск, 1996.

3. Цитович, С.Г. Горы-Горечкий земледельческий институт - первая в России высшая сельскохозяйственная школа (1836...1864). Горки, 1960.

УДК 624.131.3

П.Н. Костюкович, И.П. Крошнер (БНТУ)

### **ВЛИЯНИЕ СТЕСНЕННОЙ ДИЛАТАНСИИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫПУЧИХ И СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ**

В зоне сдвига практически всегда имеет место изменение объема грунта (дилатансия или дилатенция). Мощность этой зоны (или полосы), измеренная в направлении, перпендикулярном поверхности сдвига, крайне незначительная и не превышает 3...10 мм.

Суть дилатансии состоит в том, что в полосе сдвига происходит изменение положения частиц грунта путем их наклона, поворота, разворота, перекатывания, скольжения и других видов переупаковки и смещения. Это приводит к тому, что в зоне сдвига изменяются объем пор и плотность скелета грунта: плотные грунты разрыхляются, увеличивая свою пористость (положительная дилатансия), а рыхлые наоборот, уплотняются, уменьшая свою пористость (отрицательная дилатансия). Деформация полурыхлых и полуплотных грунтов происходит без изменения их пористости в области сдвига и, следовательно, без возникновения дилатансии (в этом случае пористость грунта, по А.Казагранде, называется *критической*).

Изменение объема грунта в полосе сдвига длится непродолжительное время, измеряемое секундами или их долями, и приводит к появлению *дилатантного распора*  $\Delta\sigma_d$  – напряжения, присущего всем сдвигам и перпендикулярного поверхности сдвига.

Дилатантный распор  $\Delta\sigma_d$  мгновенно рассеивается в окружающем горном массиве. Зона его диссипации ( $r_d$ ) в среднем составляет 30...60 см и зависит от дисперсности и минералогического состава грунтов, их фазового состояния и алгебраической суммы дейст-

вующих нормальных напряжений  $\sum \sigma_n = \sigma^*$ , с увеличением которых величина  $\Delta\sigma_d$  уменьшается. Известны случаи, когда при вертикальных нагрузках, превышающих прочность минеральных частиц и разрушающих их ( $\sigma_0 \gg \Delta\sigma_d$ ), значения  $\Delta\sigma_d$  были нулевыми, т.е. дилатансия подавлялась полностью. В этой связи рассмотрим влияние стесненной дилатансии на сдвиговую прочность сыпучих и связных грунтов.

Плоскостные сдвиговые приборы состоят из равных по высоте и независимых друг от друга обойм, заполненных монолитом грунта: верхней (сдвигаемой) и нижней (неподвижной). Вертикальная нагрузка прикладывается к верхнему торцу грунта сдвигаемой обоймы. Перед опытом она приподнимается над нижней на 0,5...1,5 мм таким образом, чтобы исключалось образование каких-либо деформаций грунта в появившейся между ними щели, которая и принимается за плоскость или поверхность сдвига.

Высота верхней обоймы не превышает 2...5 см. Поэтому сдвигаемая часть грунта находится в области диссипации  $\Delta\sigma_d$ , под действием которых верхняя обойма как бы "дышит", но с разной амплитудой при "свободном" и стесненном сдвигах: подымается в плотных грунтах за счет увеличения их пористости в зоне сдвига ( $\Delta\sigma_d > 0$ ) и опускается в рыхлых за счет их уплотнения в зоне сдвига ( $\Delta\sigma_d < 0$ ). В итоге, благодаря рычажной системе передачи напряжений, первоначальное нормальное давление на поверхности свободного сдвига не изменяется ( $\sigma_0 = const$ ) и для оценки параметров прочности грунта применяется *естественная система координат* (ЕСК)  $\tau = f(\sigma_0)$ , отражающая в плоскости свободного сдвига реальное распределение действующих напряжений как по вертикали (алгебраическая сумма сжимающих напряжений  $\sigma_0$ ), так и по горизонтали (та же сумма сдвигающих усилий  $\tau$ ). Именно в этой системе координат Ш.О.Кулон (1776 г.) открыл законы прочности

$$\tau(\sigma_0) = (\operatorname{tg}\varphi_0)\sigma_0, \quad (1)$$

$$\tau(\sigma_0) = \tau_0 + (\operatorname{tg}\varphi_0)\sigma_0 \quad (2)$$

соответственно для сыпучих (несвязных) и связных грунтов.

Наряду с рассмотренной *теорией и методологией свободного сдвига*, основанного на рычажной, т.е. независимой, системе дейст-

вия нормальных, касательных и дилатантных напряжений, существует и интенсивно разрабатывается *теория стесненного сдвига*, при котором ограничение (или подавление) свободного рассеивания дилатантного распора  $\Delta\sigma_d$ , т.е. дилатансии, осуществляется винтовой системой (в частности домкратной), дополнительно создающей постоянное сжимающее давление  $\sigma_d = \text{const}$  на плоскости сдвига. Отсюда следует, что если свободное "дыхание" верхней обоймы прибора искусственно ограничить, то сдвиг становится стесненным и ограниченная часть дилатантного распора  $\gamma(\Delta\sigma_d)$  пойдет на приращение первоначального нормального давления  $\sigma_0$  (здесь  $\gamma = \text{const}$ ). В итоге при стесненном сдвиге эффективное сжимающее напряжение на плоскости сдвига  $\sigma^*$  будет равно алгебраической сумме действующих нормальных напряжений:  $\sigma^* = \sigma_0 + \sigma_d$ , где  $\sigma_d$  – приращение нормального давления за счет ограничения свободного дилатантного распора усилием  $\sigma_d = \text{const}$ .

Таким образом, если при свободной дилатансии (свободном сдвиге) энергия дилатантного распора полностью расходуется на "дыхание" сдвигаемой части грунта и не влияет на величину суммарных сжимающих напряжений, равную  $\sigma_0$  ( $\sigma_d = 0$ ,  $\sigma_0 = \sigma^*$ ), то при стесненной дилатансии усилие домкрата  $\sigma_d$  идет на приращение нормального давления и суммарные сжимающие напряжения становятся равными  $\sigma^* = \sigma_0 + \sigma_d$ . В этой связи возникает принципиальный вопрос о том, в какой системе координат –  $\tau = f(\sigma_0)$  или –  $\tau = f(\sigma^*)$  – вести обработку опытных данных по стесненной дилатансии.

Чтобы найти ответ, воспользуемся известным правилом механики: описание любого динамического процесса должно производиться в ЕСК, отражающей реальное взаимодействие сил в этом процессе, т.е. расположенные по осям координат напряжения должны максимально точно совпадать с реальными силами, действующими в направлении этих осей. В соответствии с данным правилом *диаграмма предельных сопротивлений грунтов сдвигу как при свободной, так и при стесненной дилатансии должна строиться в ЕСК*, которая имеет вид

$$\tau = f(\sigma_0) \text{ и } \tau = f(\sigma_0 + \sigma_d) = f(\sigma^*) \quad (3)$$

соответственно для свободного ( $\sigma_d=0$ ) и стесненного ( $\sigma_d>0$ ) сдвигов.

Несмотря на очевидную логичность данных рекомендаций, в работе [1] диаграмма предельных сопротивлений грунтов сдвигу при стесненной дилатансии строится в системе координат свободной дилатансии  $\tau(\sigma_0)$ , не учитывающей домкратную систему подавления ее, т.е. применяется не "своя", а "чужая", *неестественная система координат (НСК)*. В итоге несвязные грунты превращаются в связные с огромной прочностью, поскольку для сыпучих грунтов НСК дает не присущий им закон (1), а закон Кулона для связных грунтов [1]:

$$\tau_s(\sigma_0, \sigma_d) = \sigma_d (\operatorname{tg}\varphi') + (\operatorname{tg}\varphi') \sigma_0 = \tau_d + (\operatorname{tg}\varphi') \sigma_0 (\Delta\sigma_0 \geq 0), \quad (4)$$

превращая таким путем несвязный (сыпучий) грунт (1) в связный (4) с "дилатометрической связностью"

$$\tau_d = \sigma_d (\operatorname{tg}\varphi') = \operatorname{const} \quad (5)$$

и коэффициентом дилатантного (контактного) трения

$$\operatorname{tg}\varphi' = (\tau_s - \tau_d) / \sigma_0 = \tau_d / \sigma_d, \quad (6)$$

убывающим с ростом интенсивности подавления дилатансии  $\sigma_d$ . Здесь  $\tau_s$  – прочность сыпучего грунта по Соболевскому;  $\tau_d$  – "дилатометрическая связность" этого грунта, равная отрезку оси  $\tau_s$ , отсекаемому прямой (4);  $\operatorname{tg}\varphi'$  – угловой коэффициент этой прямой.

Чтобы получить объективное представление о влиянии стесненной дилатансии на прочность сыпучих грунтов, обработку опытных данных по свободному и стесненному сдвигам будем производить в ЕСК. Тогда увидим, что и при стесненной дилатансии предельные сопротивления сдвигу сыпучих грунтов  $\tau_k$  также прямо пропорциональны суммарным сжимающим напряжениям  $\sigma^*$ , т.е. подчиняются закону Кулона для этих грунтов при свободной дилатансии ("закону сухого трения Кулона") (таблица 1)

$$\tau_k(\sigma^*) = (\operatorname{tg}\varphi') \sigma^* (\sigma^* \geq \sigma_d) \quad (7)$$

без придания им "дилатометрической связности", но с изменением коэффициента внутреннего трения грунта при свободном сдвиге

$\operatorname{tg}\varphi_0$  на коэффициент внутреннего трения этого грунта  $\operatorname{tg}\varphi'$  в условиях стесненного сдвига:

откуда видно, что с ростом неподвижной пригрузки  $\sigma_d$  величина  $\operatorname{tg}\varphi'$  уменьшается ( $\operatorname{tg}\varphi' \rightarrow 0$  при  $\sigma_d \rightarrow \infty$ ) и, наоборот,  $\operatorname{tg}\varphi' \rightarrow \operatorname{tg}\varphi_0$  при  $\sigma_d \rightarrow 0$ , т.е. с увеличением  $\sigma_d$  прямые (7) поворачиваются относительно прямой Кулона (1) в сторону уменьшения их  $\operatorname{tg}\varphi'$ . Так происходит потому, что в ЕСК одна и та же прочность грунта при свободном ( $\sigma_d = 0$ ) и стесненном ( $\sigma_d > 0$ ) сдвигах достигается при одинаковых величинах нормальных напряжений, если какие-либо физические силы не изменяют фазового состояния грунта.

Таблица 1 – Определение прочностных характеристик крупного сухого песка ( $d_{50} = 1,5$  мм), испытанного в условиях свободной ( $\sigma_d = 0$ ) и стесненной ( $\sigma_d = 471$  кПа) дилатансии, в различных системах координат: естественной ( $\tau(\sigma_0)$  для  $\sigma_d = 0$  и  $\tau_k(\sigma^*)$  для  $\sigma_d = 471$  кПа) и неестественной ( $\tau_s(\sigma_0)$  для  $\sigma_d = 471$  кПа). Опытные данные Д.Ю.Соболевского, 1994 г.

$\sigma_0$ кПа	$\sigma_d=0$	$\sigma_d=471$ кПа		
	$\tau(\sigma_0) = 0,97\sigma_0$ кПа	$\tau_s(\sigma_0) = 292 + 0,62\sigma_0$ кПа	$\tau_k(\sigma^*) = 0,62\sigma^*$ кПа	$\Delta\tau$ кПа
0	0	292	292	292
100	97	354	354	257
200	194	416	416	222
300	291	478	478	187
400	388	540	540	152
500	485	602	602	117
834,3	809,3	809,3	809,3	0
1000	970	912	912	- 58
2000	1940	1532	1532	- 408

$$\operatorname{tg}\varphi' = \tau_k/\sigma^* = \tau_d/\sigma_d = 1/(\sigma_d/\tau_{0s} + 1/\operatorname{tg}\varphi_0), \quad (8)$$

Сопоставляя (1) с (7), получаем, что поправка  $\Delta\tau$  на изменение естественной прочности сыпучих грунтов за счет подавления дилатансии в зоне сдвига (по сравнению с их кулоновской прочностью в условиях свободного сдвига) составляет:

$$\Delta\tau = \tau_k - \tau = \tau_d - (\operatorname{tg}\varphi_0 - \operatorname{tg}\varphi') \sigma_0. \quad (9)$$

Функция (9) представляет собой прямую с угловым коэффициентом  $-(tg\varphi_0 - tg\varphi')$  и начальными отрезками: в координатах  $\Delta\tau(\sigma_0) \rightarrow \Delta\tau_{max} = \tau_d$  при  $\sigma_0 = 0$  и  $\sigma_0 = \sigma_{0s}$  при  $\Delta\tau = 0$ ; в координатах  $\Delta\tau(\sigma^*) \rightarrow \Delta\tau_{max} = \tau_d$  при  $\sigma^* = \sigma_d$  и  $\sigma^* = \sigma_{0s} + \sigma_d$  при  $\Delta\tau = 0$ . Таким образом, с ростом  $\sigma^*$  (или  $\sigma_0$ ) прибавка прочности грунта  $\Delta\tau$  уменьшается по линейному закону от максимальной величины  $\Delta\tau_{max} = \tau_d$  при  $\sigma^* = \sigma_d$  (или  $\sigma_0 = 0$ ) до  $\Delta\tau = 0$  при  $\sigma^* = \sigma_{0s} + \sigma_d$  (или  $\sigma_0 = \sigma_{0s}$ ), где  $\sigma_{0s}$  и  $\tau_{0s}$  — абсцисса и ордината точки пересечения прямых (1) и (4) (при  $\sigma_0 > \sigma_{0s}$  подавление дилатансии приводит к обратному эффекту и  $\tau(\sigma_0) > \tau_s(\sigma_0)$ , см. таблицу 1). Эту закономерность изменения  $\Delta\tau$  необходимо учитывать при возникновении дополнительного сжатия грунта усилием  $\sigma_d = const$ .

Полагая, что физика стесненного сдвига сыпучих и связных грунтов идентичны, получаем диаграмму предельных сопротивлений связных грунтов стесненному сдвигу

$$\tau_k(\sigma^*) = \tau_k + (tg\varphi')\sigma^* = \tau_0(tg\varphi'/tg\varphi_0) + (tg\varphi')\sigma^*. \quad (10)$$

Таким образом, ЕСК показывает, что *ограничение дилатансии не придает сыпучим грунтам никакой связности, а влияет только на их внутреннее трение, переводя угол внутреннего трения при свободной дилатансии  $\varphi_0$  в угол внутреннего трения при стесненной дилатансии  $\varphi'$* . При свободном сдвиге  $\sigma_d = 0$  и  $\varphi' = \varphi_0$ . Поэтому при различных значениях  $\sigma_d$  графики  $\tau_k(\sigma^*)$  образуют семейства прямых, исходящих из начала координат ( $\tau_k = \sigma^* = 0$ ) и располагающихся ниже прямой свободного сдвига под углами  $\varphi' < \varphi_0$ .

Вторым примером применения ЕСК для обработки опытных данных по сдвиговым деформациям может служить сдвиг водонасыщенных песков. В этом случае при наличии дренажа изменение пористости в полосе сдвига также приводит к изменению нормального давления  $\sigma_0$  на величину порового давления воды  $\sigma_w$ . В результате фактическое нормальное давление становится равным  $\sigma^* = \sigma_0 + \sigma_w$  и закон Кулона для свободной дилатансии принимает вид закона сопротивления сдвигу для стесненной дилатансии (7):  $\tau_k = (tg\varphi')(\sigma_0 + \sigma_w) = (tg\varphi')\sigma^*$ . Отсюда следует, что сдвиговые деформации водонасыщенного песка никогда не протекают по закону свободного сдвига сыпучих грунтов, а всегда — или по закону *простого стесненного сдвига*, если в изменении  $\sigma_0$  принимает участие

только один фактор – поровое давление воды  $\sigma_w$ , или по закону *сложного стесненного сдвига*, когда изменение  $\sigma_0$  происходит за счет воздействия многих факторов: порового давления воды  $\sigma_w$ , ограничения дилатансии  $\sigma_d$  и т.д.

Данные исследования позволяют сделать следующие выводы:

В условиях свободного сдвига первоначальное нормальное давление на поверхности сдвига не изменяется ( $\sigma_0 = \text{const}$ ) и для оценки параметров прочности грунта применяется *естественная система координат (ЕСК)*  $\tau = f(\sigma_0)$ , отражающая в плоскости сдвига реальное распределение действующих напряжений как по вертикали (алгебраическая сумма сжимающих напряжений  $\sigma_0$ ), так и по горизонтали (та же сумма сдвигающих усилий  $\tau$ ). Очевидно, если хотя бы на одной из осей координат откладываются нереальные значения действующих сил, то применяется *неестественная система координат (НСК)*, которая приводит к некорректным зависимостям и выводам. Классическим примером использования НСК в механике грунтов является описание стесненного сдвига сыпучих грунтов в системе координат свободного сдвига, в результате чего сухие пески приобретают связность и становятся подобными плотным песчанникам.

Доказано, что в условиях стесненной дилатансии при использовании  $\sigma^*$  мы "работаем" в ЕСК  $\tau_k = f(\sigma^*)$  и получаем достоверные результаты, а применение  $\sigma_0$  приводит к НСК и соответственно к ошибочным заключениям.

Анализ стесненного сдвига сыпучих грунтов в ЕСК  $\tau_k = f(\sigma^*)$  показал, что и при ограниченной дилатансии сопротивление сдвигу этих грунтов подчиняется закону сухого трения Кулона для свободной дилатансии, т.е. и здесь предельные сопротивления стесненному сдвигу  $\tau_k$  прямо пропорциональны суммарным сжимающим давлениям  $\sigma^*$ :  $\tau_k = (\text{tg}\varphi')\sigma^*$ , где численно  $\text{tg}\varphi' = \tau_k$  при  $\sigma^* = 1$ . Это значит, что ограничение дилатансии не придает сыпучим грунтам никакой (и прежде всего "дилатометрической") связности, а сказывается только на их внутреннем трении, изменяя прочность на величину  $\Delta\tau$ .

Сдвиговые деформации геоснований в условиях стесненной дилатансии происходят в двух случаях: при возникновении интерференции зон влияния дилатантного распора  $r_d$  (например, когда забивные сваи располагаются густо, т.е. на расстояниях  $L \leq 2r_d$ ) и

при наличии в этих зонах неподвижных преград (скальных пород, бетонных стенок и т.д.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соболевский, Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта: автореф... дис. д-ра техн. наук. – Минск, 1998. – 35 с.

УДК 628.3

А.Г. Воронин (БНТУ)

### **ТЕХНОЛОГИЯ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОКОМБИНАТОВ ОТ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Общей характерной особенностью сточных вод предприятий мясомолочной промышленности, таких как мясокомбинаты и мясоперерабатывающие заводы, является высокая концентрация жировых загрязнений, в пределах 200-1500 мг/л, значительная часть которых (до 300 -500 мг/л) содержится в виде чрезвычайно стабильных эмульсий и коллоидных растворов. Кроме того, сточные воды этих предприятий являются основным источником фосфора, в значительной степени способствуя эвтрофикации водоемов, тем самым ухудшая экологическую обстановку в отдельных регионах республики. Поэтому повышение эффективности очистки высококонцентрированных сточных вод мясокомбинатов является одной из наиболее актуальных задач охраны водоемов от загрязнения.

Технология и сооружения, используемые для очистки этих сточных вод, к настоящему времени морально и физически устарели и не позволяют обеспечить необходимую эффективность очистки не только при сбросе очищенных стоков в открытые водоемы, но даже и при их сбросе в городскую канализацию.

Для достижения нормативных показателей приема в городскую канализацию уже недостаточно будет только извлечения жира и неполной биологической очистки сточных вод. Современные технологии должны обеспечивать также и соответствующее уменьше-

ние концентрации азота и фосфора, особенно при сбросе очищенных стоков в открытые водоемы, что требует существенной их глубокой очистки с уменьшением концентрации взвешенных веществ и БГЖ<sub>П</sub> до 3-6 мг/л и полным изъятием жиров.

В 2004 году планируется издание строительных норм Республики Беларусь (Канализация населенных пунктов. Общие положения и требования), основным разработчиком которых являлась кафедра «Водоснабжение и водоотведение». В этих строительных нормах одним из требований при биологической очистки сточных вод является - остаточная концентрация азота и фосфора в очищенных сточных водах, сбрасываемых в открытые водоемы, и регламентируется концентрация азота - 5-8 мг/л и фосфора 1-2 мг/л.

В итоге проведенных научных исследований кафедрой «Водоснабжение и водоотведение» разработана технология очистки жиросодержащих сточных вод предприятий мясомолочной промышленности, которая включает три ступени очистки:

1-я ступень - реагентная обработка сточных вод с последующим отстаиванием;

2-я ступень — флотационная обработка сточных вод в камере флотации в течении 30 минут;

3-я ступень - доочистка сточных вод на фильтрах из нетканых материалов отечественного производства.

Жиросодержащие сточные воды, прошедшие очистку на локальных очистных сооружениях по предлагаемой схеме, удовлетворяют нормативным требованиям при сбросе стока в городскую канализацию [1].

При сбросе этих сточных вод в водоемы или водотоки необходима доочистка как по жирам, так и по биогенным элементам (азота и фосфора) до нормативных требований.

Основными недостатками традиционной биологической очистка сточных вод в аэротенках является низкая скорость процесса, невозможность удаления из сточных вод азота и фосфора, высокие затраты электроэнергии на аэрирование. Низкая скорость процесса определяется невысокой концентрацией активного ила в аэротенках, не превышающей 3 г/л. Попытка увеличить эту концентрацию приводят к увеличению выноса взвешенных веществ из вторичных отстойников, что равносильно снижению эффекте очистки, так как

каждый мг активного ила, выносимого из вторичных отстойников, дает от 0,5 до 1 мг прироста БПК<sub>п</sub> очищенных сточных вод.

Концентрация азота и фосфора в сточных водах достигает высоких значений. При высоких температурах сточных вод, т.е. в летних условиях, в аэротенках частично протекают процессы нитрификации - окисление аммонийного азота до нитритов и нитратов, в то время как фосфор практически не задерживается в аэротенках, так как лишь небольшая его часть (около 1 %) от веса сухого вещества активного ила) поглощается микроорганизмами для синтеза биомассы. Соединения азота (в том числе нитриты и нитраты) и фосфора, попадая в водоем с очищенными сточными водами, вызывают его эвтрофикацию.

В настоящее время известно несколько конфигураций аэротенков для повышения эффективности биологического удаления азота и фосфора [2]. Все технологические схемы их работы можно разделить на две группы:

- схемы, требующие особой конструкции реактора;
- схемы, которые можно воспроизвести в обычных коридорных аэротенках.

Разработанные модификации метода биологической очистки сточных вод в аэротенках позволяют комплексно устранить присущие традиционному методу недостатки. Сущность различных модификаций состоит в преобразовании традиционных аэротенков в анаэробно-аэробную систему. В соответствии с этим, в аэротенке выделяются анаэробная, денитрификационная и нитрификационная зоны, которые смесь сточной воды и активного ила проходит последовательно. При этом, азиррованию подвергается только нитрификатор. Из нитрификатора циркуляционный поток сточной воды возвращается в денитрификатор. При отсутствии азрации в денитрификаторе развивающиеся в нем денитрифицирующие бактерии расщепляют молекулы нитритов и нитратов. Выделяющийся при этом кислород используется активным илом для «дыхания» и удовлетворения энергетических потребностей, а выделяющийся азот в виде  $N_2$  улетучивается в атмосферу. Таким образом, происходит почти полное удаление азота из сточных вод.

В результате попеременного воздействия на активный ил анаэробных и аэробных условий в активном иле развиваются определенные бактерии, например, виды «ацинетобактер» которые могут

накапливать в клетках фосфор в большом количестве в виде полифосфата. В результате этого изменения биоценоза фосфор в значительно большей концентрации связывается биомассой, нежели в обычных установках, и удаляется из системы с избыточным активным илом.

Активный ил в анаэробно-аэробной системе характеризуется меньшей влажностью и меньшим иловым индексом, следовательно, можно увеличить его концентрацию в аэротенках без увеличения выноса из вторичных отстойников.

Анаэробно-аэробный метод можно применять как при строительстве новых, так и при реконструкции существующих аэротенков. При этом, кроме увеличения эффекта очистки по БПК, ХПК, азоту и фосфору удается существенно увеличить пропускную способность аэротенков.

Этот метод обладает также рядом других преимуществ, по сравнению с традиционными, из которых можно выделить следующие:

- расход воздуха на аэрацию уменьшается на 30%;
- ионы тяжелых металлов связываются в нерастворимые в воде сульфиды и переходят в осадок;
- количество избыточного активного ила уменьшается в два раза;
- система устойчиво работает при залповом поступлении токсичных веществ.

Для реализации биологического метода по удалению азота и фосфора наряду с реконструкцией существующих аэротенков, требуется также установка в анаэробной и денитрификационной зонах погружных мешалок, способствующих реализации процессов очистки сточных вод и предотвращающих осаждение активного ила.

Приведенные теоретические разработки получили применение при выполнении технического проекта для реконструкции станции аэрации города Минска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воронин, А.Г. Охрана водоемов от загрязнения сточными водами предприятиями мясной промышленности. Материалы областной научно-технической конференции. Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности.

2. Щетинин, А.И. Сопоставительная оценка известных конфигураций аэротенков для удаления азота и фосфора. Сборник докладов международного конгресса ЭТЭВК- 2003.

УДК 624.131.3

И.П. Крошнер (БНТУ)

## **ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ФАЗОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЛИНЕЙНОЙ ФАЗОВОЙ МОДЕЛИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ**

Для оценки осадок геосложений К.Терцаги в 1919 г. была предложена расчетная схема грунта с абсолютно жесткими, неподвижными и непроницаемыми границами между его фазами: твердыми (минеральными) частицами ( $q_1, V_1$ ), водой ( $q_2, V_2$ ) и воздухом ( $q_3, V_3$ ). Эта схема с вытекающими из нее формулами по расчету фазовых характеристик (ФХ) является основой современного грунтоведения и механики грунтов. Поэтому по предложению проф. М.Н. Гольдштейна (1952 г.) она называется фазовой моделью (ФМ) дисперсных грунтов. В работах [1-3] установлено определяющее уравнение данной модели и доказано, что она является линейной. В этой связи и возникла необходимость в графоаналитическом представлении ее констант и функций.

Анализ ФМ Терцаги показал, что условия (или критерии) ее существования в обобщенном виде можно представить как сумму четырех основных положений:

1) Свойств фаз:

$$|q_2| = |V_2|; q_3 = 0. \quad (1)$$

2) Признаков нейтральности фаз (не допускают изменения объема и массы фаз при увлажнении и обезвоживании грунта):

$$\left. \begin{aligned} q_1 = \text{const} \neq f(W); & \quad V_1 = \text{const} \neq f(W); \\ V_n = V_2 + V_3 = \text{const} \neq f(W); & \quad V_{\text{ск}} = V = \text{const} \neq f(W). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3) Балансовых равенств (массового и объемного):

$$q = q_1 + q_2 \rightarrow 1 = q_1/q + q_2/q = m_q + W_q; \quad (3)$$

$$q/V = q_1/V + q_2/V \rightarrow \rho = \rho_d + \rho_w; \quad (4)$$

$$V = V_1 + V_n \rightarrow 1 = V_1/V + V_n/V = m_V + n. \quad (5)$$

4). Необходимого и достаточного условия оценки фазового состояния грунта – экспериментальное измерение 4-х основных фазовых величин

$$q, V, q_1, V_1. \quad (6)$$

где  $q$  – масса влажного грунта объемом  $V$ ;  $q_1$  – масса абсолютно сухого грунта (его скелета или каркаса), равная массе твердых частиц;  $V_1$  – объем твердых частиц;  $q_2$  – масса воды объемом  $V_2$ ;  $V_{\text{ск}}$  – объем скелета грунта, равный объему грунта  $V$ ;  $V_n$  – объем пор.

Докажем, что исходные величины (6) позволяют определять все ФХ грунта: **основные** (прямые или опытные) – без использования балансовых равенств (3)...(5) – и **расчетные** (косвенные или производные), которые выражаются через основные и вычисляются с использованием этих равенств.

Анализ условий 1)...4) показывает, что из опытных величин (6) парные сочетания

$$(q, V), (q_1, V_1), (q_1, V), (q_1, q) \text{ и } (V_1, V) \quad (7)$$

имеют физический смысл и образуют группу основных ФХ, куда входят: плотность влажного грунта  $\rho = q/V = f(W)$ ; плотность твердых (минеральных) частиц  $\rho_s = q_1/V_1 = \text{const}$ ; плотность абсолютно сухого грунта  $\rho_d = q_1/V_{\text{ск}} = q_1/V = \text{const}$ ;

$$m_v = V_1/V = 1 - n = \rho_d / \rho_s = \text{const} - \quad (8)$$

объемная скелетность грунта, равная доли объема твердых частиц в объеме скелета (является естественным критерием степени уплотненности грунта и потому может быть названа *коэффициентом предельного уплотнения грунта*).

Остальные ФХ являются расчетными и вычисляются с использованием разностей  $q_2 = q - q_1$  и  $V_n = V - V_1$ , вытекающих из балансовых равенств (3) и (5):

*пористость*

$$n = V_n/V = e / (1 + e) = 1 - \rho_d / \rho_s = \text{const}, \quad (9)$$

поскольку

$$n = V_n / (V_1 + V_n) = (V_n / V_1) / (1 + V_n/V_1) = e / (1 + e),$$

$$n = (V - V_1)/V = 1 - (V_1/q_1)/(V/q_1) = 1 - \rho_d / \rho_s$$

*коэффициент пористости*

$$e = V_n/V_1 = n / (1 - n) = \rho_s / \rho_d - 1 = \text{const}, \quad (10)$$

поскольку

$$e = (V_n/V) / [(V - V_n)/V] = n / (1 - n),$$

$$e = (V - V_1)/V_1 = (V/q_1) / (V_1/q_1) - 1 = \rho_s / \rho_d - 1;$$

*абсолютная влажность* (доля массы воды в массе скелета грунта)

$$W = q_2/q_1 = (q - q_1)/q_1 = (q/V) / (q_1/V) - 1 = (\rho / \rho_d) - 1; \quad (11)$$

*объемная влажность* ( $W_0$ ) или "водная" плотность ( $\rho_w$ ) скелета

$$W_0 = \rho_w = V_2/V = q_2/V = \rho - \rho_d = \rho_d W, \quad (12)$$

поскольку

$$W_0 = \rho_w = q_2 / V = (q - q_1) / V = \rho - \rho_d;$$

$$W_0 = \rho_w = q_2 / V = (q_2 / q_1) / (V / q_1) = \rho_d W;$$

*степень влажности грунта* (степень заполнения пор водой)

$$S_r = V_2 / V_n = W_0 / n = (\rho_s / e) W = (\rho_d / n) W, \quad (13)$$

поскольку

$$S_r = V_2 / V_n = (V_2 / V) / (V_n / V) = W_0 / n; S_r = (q_2 / V_n) = (q_2 / V_1) / e = (\rho_s / e) W;$$

$$S_r = q_2 / (V - V_1) = W / (1 / \rho_d - 1 / \rho_s) = (\rho_d / n) W;$$

*полная влагоемкость* – максимальная влажность грунта, наблюдаемая при полном заполнении пор водой

$$W_{sat} = W_{max} = q_{2max} / q_1 = e / \rho_s = n / \rho_d = \text{const}, \quad (14)$$

поскольку

$$q_{2max} / q_1 = V_n / q_1 = (V_n / V_1) / (q_1 / V_1) = e / \rho_s;$$

$$W_{sat} = V_n / q_1 = (V_n / V) / (q_1 / V) = n / \rho_d.$$

Если полную влагоемкость выражать через объемную влажность

$W_{0sat} = W_{0max}$ , то при  $V_2 = V_n$  будем иметь:

$$W_{0sat} = W_{0max} = V_n / V = n = \text{const}. \quad (15)$$

Приведенные зависимости составляют основу современной ФМ. Чтобы расширить и уточнить физико-математический смысл ее констант ( $\rho_d$ ,  $\rho_s$ ,  $n$ ,  $e$ ) и функций влажности ( $W_0$ ,  $\rho$ ,  $S_r$ ), представим ФХ модели как угловые коэффициенты или начальные отрезки в

соответствующих графоаналитических преобразованиях, отражающих прямую функциональную связь между данными параметрами.

С этих позиций особый интерес представляют основные ФХ и прежде всего главная константа механики грунтов  $\rho_s$ . Физически она зависит от соотношения  $q_1/V_1$ , в которое могут быть вовлечены три константы:  $\rho_d = q_1/V$ ,  $n = (V-V_1)/V$  и  $e = (V-V_1)/V_1$ . Анализ зависимостей (9) и (10) показывает, что экспериментальной апробации наиболее доступна одна из них:

$$\rho_s = \rho_d + \rho_d e. \quad (16)$$

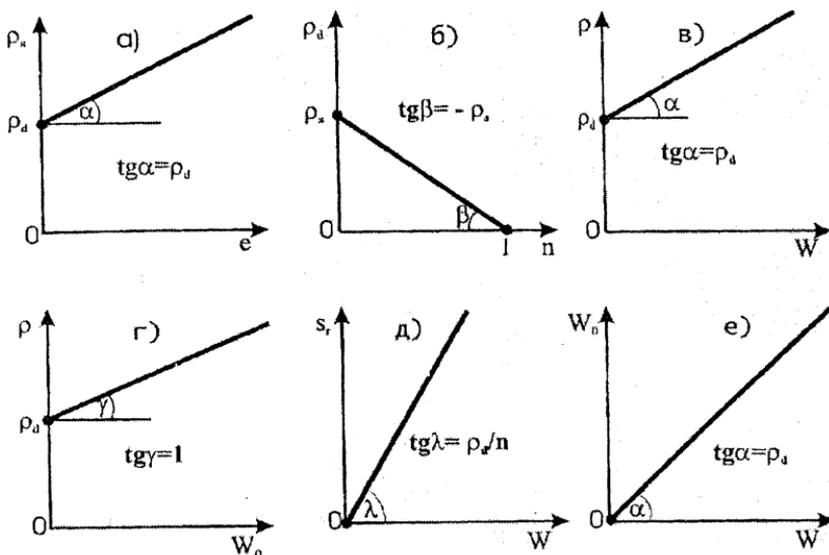


Рисунок 1 – Графоаналитическое представление главных корреляционных соотношений между фазовыми характеристиками линейной фазовой модели дисперсных грунтов:

- а)  $\rho_s(e) = \rho_d + \rho_d e$ ; б)  $\rho_d(n) = \rho_s - \rho_s n$ ; в)  $\rho(W) = \rho_d + \rho_d W$ ; г)  $\rho(W_0) = \rho_d + W_0$ ;  
 д)  $S_r(W) = (\rho_d/n) W$ ; е)  $W_0(W) = \rho_d W$ .

Функция  $\rho_s(e)$  – возрастающая кусочно-линейная (рисунок 1,а) с начальным отрезком

$$\rho_s = \rho_d \text{ при } \rho_s = e = 0 \quad (17)$$

и угловым коэффициентом

$$\rho_d = (\rho_{s2} - \rho_{s1}) / (e_2 - e_1) = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}. \quad (18)$$

Второй по значимости ФХ в теории ФМ грунтов является плотность скелета  $\rho_d$ . Из (9)...(13) имеем

$$\rho_d = \rho - W_0 = \rho / (1 + W) = n(S_r / W) = \rho_s / (1 + e) = \rho_s - \rho_s n. \quad (19)$$

В корреляционном отношении практическое значение имеет последнее равенство. Его можно сформулировать как закон изменения функции  $\rho_d(n)$ : с ростом пористости грунта плотность его скелета уменьшается по линейной зависимости от максимальной величины  $\rho_d = \rho_s$  при  $n = 0$  до  $\rho_d = 0$  при  $n = 1$  (рисунок 1, б); темп уменьшения  $\rho_d(n)$  – угловой коэффициент этой прямой – характеризуется константой

$$\operatorname{tg} \beta = (\rho_{d2} - \rho_{d1}) / (n_2 - n_1) = -\rho_s = \operatorname{const}. \quad (20)$$

Третья основная ФХ грунта является функцией его влажности (рисунок 1, в):

$$\rho(W_0) = \rho(W) = \rho_d + W_0 = \rho_d + \rho_d W. \quad (21)$$

Из (21) видно, что с ростом влажности грунта  $W$  значение его плотности  $\rho(W)$  линейно возрастает от минимальной величины  $\rho = \rho_d$  при  $W = 0$  до максимальной

$$\rho_{max} = \rho_d(1 + W_{sat}) = \rho_d + n \quad (22)$$

при полной влагоемкости грунта; темп роста функции  $\rho(W)$  – угловой коэффициент этой прямой – характеризуется константой  $\rho_d = \operatorname{tg} \alpha$ .

Аналогично график функции  $\rho(W_0)$  представляется прямой с начальным отрезком  $\rho = \rho_d$  при  $W_0 = 0$  и угловым коэффициентом  $\operatorname{tg} \gamma = 1$  (рис. 1, г).

Из расчетных ФХ только две -  $S_r(W)$  и  $W_0(W)$  – обладают прямой функциональной связью между ними и влажностью. Из (13) следует, что функция  $S_r(W)$  является прямолинейной, выходящей из начала координат  $S_r = W = 0$  и имеющей угловой коэффициент  $\operatorname{tg} \lambda = \rho_d/n = (\operatorname{tg} \alpha)/n$ . Поскольку в реальных грунтах  $n \ll 1$ , то  $\operatorname{tg} \lambda \gg \operatorname{tg} \alpha$  (рисунок 1, д).

Из всех фазовых соотношений двойная функция влажности  $W_0(W = \rho_w(W) = \rho_d W)$ , выражаемая зависимостью (12), удовлетворяет основным требованиям определяющего уравнения ФМ: в качестве независимого аргумента имеет влажность ( $W$ ) как единственный фактор, наиболее полно определяющий фазовое состояние грунтов; указывает на существование прямой функциональной связи между “водной” плотностью скелета ( $\rho_w$ ) и влажностью грунта ( $W$ ); легко проверяется опытом; является прямолинейной и содержит один универсальный не комплексный параметр

$$\rho_d = W_0/W = \rho_w/W = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const} \quad (23)$$

угловой коэффициент прямой  $W_0(W) = \rho_w(W) = q_1(V)$ , исходящей из начала координат ( $W_0 = \rho_w = W = 0$  или  $q_1 = V = 0$ ) (рисунок 1, е). На этом основании функция (12) принята в качестве математической модели фазового состояния грунтов. Линейность ( $W_0 = \rho_d W$ ) или нелинейность ( $W_0 = \rho_d(W)W$ ) этой функции однозначно указывают на линейность или нелинейность ФМ грунта, т.е. на независимость или зависимость от  $W$  фазовых констант ( $\rho_s$ ,  $\rho_d$ ,  $n$ ,  $e$  и др.). Доказано [4, 5], что биогенные и глинистые грунты естественной структуры практически на всем диапазоне изменения их влажности подчиняются нелинейным ФМ, в которых все ФХ являются нелинейными функциями  $W$ .

### Выводы:

Установлено, что критерии существования ФМ дисперсных грунтов включают: свойства фаз и признаки их нейтральности, балансовые равенства, необходимое и достаточное условие определения ФХ грунтов – экспериментальное измерение четырех фазовых величин ( $q$ ,  $V$ ,  $q_1$ ,  $V_1$ ). Эти критерии должны стать методологиче-

ской основой оценки фазового состояния грунтов в полевых и лабораторных условиях.

Доказано, что ФХ  $\rho_s, \rho_d, \rho, m_v$  – относятся к основным. Они вычисляются по опытным величинам  $(q, V, q_1, V_1)$  без привлечения балансовых равенств. Остальные ФХ –  $n, e, W_0$  или  $\rho_w, W, S_r, W_{sat}$  – являются расчетными, поскольку определяются с привлечением балансовых равенств и выражаются через три основные характеристики  $(\rho_s, \rho_d, \rho)$ . Точность оценки основных и расчетных ФХ одинаковая, так как связующим звеном между ними являются четыре экспериментально измеряемые фазовые величины  $(q, V, q_1, V_1)$  и три опытные плотности  $(\rho_s, \rho_d, \rho)$ . Таким образом, инженерно-геологическая классификация ФХ на основные и расчетные наконец получила научное обоснование. Отсюда следует, что экспериментальное определение исходных фазовых величин должно стать нормой всех рекомендаций и стандартов по инженерно-геологическим изысканиям и лабораторным методам оценки фазового состояния грунтов.

С целью изучения корреляционных связей между ФХ грунтов среди них необходимо различать константы  $(\rho_s, \rho_d, n, e, m_v, W_{sat})$  и линейные функции влажности  $(W_0(W), \rho(W), \rho(W_0), S_r(W))$ , наблюдаемые только в линейной ФМ (модели К.Терцаги). Установлено, что прямая функциональная зависимость между ФХ существует внутри этих групп, т.е. в отдельности или между константами, или между линейными функциями  $W$ . Искать корреляционные связи между ФХ, которые являются нелинейными функциями  $W$ , не следует, поскольку такие связи здесь не существуют. Поэтому при обработке массивов опытных данных по ФХ грунтов статистическими или графоаналитическими методами необходимо прежде всего устанавливать тип ФМ этих грунтов: они линейные, нелинейные или комбинированные. Доказано [4, 5], что в нелинейных ФМ, которым подчиняется фазовое состояние биогенных и большинства глинистых грунтов, все ФХ являются нелинейными функциями  $W$ .

Графоаналитическое представление констант линейной ФМ в виде угловых коэффициентов или начальных отрезков соответствующих линейных преобразований, отражающих характер прямых функциональных связей между ними, имеет ряд преимуществ перед традиционной методикой их дифференцированно-табличного

представления: а) уточняется и расширяется физико-математический смысл ФХ, особенно в условиях предельного перехода одной фазы в другую; б) осуществляется обобщенный анализ массивов опытных данных и корреляционных связей между ФХ; в) является мощным методологическим средством исследования ФМ дисперсных грунтов.

Установлено, что основу графоаналитических методов исследования ФХ в линейной и нелинейных ФМ составляют функции  $W_0(W)$ ,  $Sr(W)$ ,  $ps(e)$ ,  $\rho_A(n)$ ,  $\rho(W)$ ,  $\rho(W_0)$ , представленные зависимостями (12), (13), (16), (19), (21).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костюкович, И. П. Динамика фазовых характеристик влажных грунтов при их уплотнении // Материалы международной 53-й научно-технической конференции БГПА. Часть 3. – Минск, 1999. – 30 с.
2. Костюкович, И. П., Костюкович, П. Н. Фазовые модели грунтов Беларуси // Материалы международной 54-й научно-технической конференции БГПА. Часть 7. – Минск, 2000. – 124 с.
3. Костюкович, И. П. Главные корреляционные соотношения между фазовыми характеристиками влажных грунтов // Проблемы мелиорации, водохозяйственного строительства и обустройства сельских территорий на современном этапе: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию образования БГСХА. – Горки, 2001. – С. 218-223.
4. Крошнер, И. П. Водно-физические свойства грунтов Беларуси // Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии: Сборник трудов международной научно-практической конференции / Под ред. Н.П. Блещика. – Мн.: Технопринт, 2000. – С. 516-524.
5. Крошнер, И. П., Костюкович, П. Н. Константы и функции фазовых моделей дисперсных грунтов // Будівельні конструкції. Випуск 53. Книга 1. – Київ: НДЦБК, 2000. – С. 141-144.

## К ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЕЛ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Важной задачей проектирования водопроводящих каналов является обеспечение устойчивости русел (особенно в несвязных грунтах). Существующие методы гидравлического расчета русел по методу средней скорости и влекущей силы [1, 2] не учитывают в полной мере реального распределения по периметру локальных придонных скоростей и касательных напряжений.

В настоящее время теоретически и экспериментально доказано, что поле осредненных скоростей в прямолинейных каналах некруглого поперечного сечения трехмерно [4, 5], т.е. существуют небольшие поперечные компоненты, образующие совместно с основным продольным компонентом стационарные винтовые течения, которые оказывают существенное влияние на процессы движения воды и перенос взвешенных и донных наносов.

Автором выполнены экспериментальные исследования трехмерных турбулентных течений в прямолинейных лабораторных и натурных трапецеидальных каналах [3], в результате которых установлено, что при любых соотношениях поперечных размеров русла существуют стационарные винтовые течения, охватывающие значительную область потока, которые интенсифицируют конвективный массообмен, оказывают существенное влияние на распределение по сечению турбулентных характеристик, перераспределяют по смоченному периметру гидродинамические усилия, вызывая появление их локальных экстремумов. Анализ результатов показывает, что максимальные значения придонных осредненной  $V_1$  и актуальной  $V_a = V_1 + 3 \sqrt{V_1^2}$  скоростей имеют место на откосах канала в области встречи нисходящих токов винтовых течений с жесткими границами, а минимальные значения – в области восходящих токов. Аналогичная закономерность обнаруживается в распределении по периметру касательных напряжений на стенке [4].

Характерной чертой при формировании русел прямолинейных участков земляных каналов является размыв боковых откосов и по-

вышение дна вследствие отложения в этой области наносов. Попытаемся пояснить такой механизм деформации сечений.

При параллельно струйном движении потока на прямолинейном участке канала через определенное время можно было бы ожидать стабилизации размыва, так как на место унесенной частицы грунта будет доставлена другая из соответствующих точек вышерасположенных сечений. Существование устойчивых винтовых течений приводит к тому, что частица грунта, взвешенная мгновенной скоростью, будет транспортироваться не только вдоль потока, но и с осредненной скоростью будет перемещаться и поперек русла. Таким образом, устойчивость русла канала будет зависеть не только от величины придонной скорости, но и в значительной степени от ее направления, особенно если учесть, что основной формой движения донных наносов является качение и сальтация. Если вектор осредненной скорости направлен от основания откоса канала к урезу воды, то частица грунта будет поддерживаться на откосе осредненным движением. В противном случае осредненная скорость будет способствовать смыву частиц грунта с откоса и переносу их на горизонтальное дно канала к середине сечения и, следовательно, – русло будет расширяться, а его глубина уменьшаться.

Таким образом, русло земляного канала, запроектированное по методу допускаемой на размыв средней скорости или допускаемой влекущей силы, без учета направления винтовых течений будет деформироваться с образованием зон преимущественного размыва и преимущественного отложения наносов. Определение местоположения этих областей, позволит обосновать инженерные мероприятия, обеспечивающие повышения устойчивости русел земляных каналов. Учитывая многообразие условий, это возможно осуществить лишь методами математического моделирования.

С помощью математической модели трехмерного поля осредненных скоростей в каналах трапецеидального поперечного сечения с переменной по периметру шероховатостью [5, 6] выполнены расчеты трехмерных течений для проектных трапецеидальных русел и сформированных в процессе эксплуатации устойчивых сечений канализованной реки Морочь (данные Белгипроводхоза) [1, 2]

Установлено, что расчетные винтовые течения хорошо объясняют результаты деформаций проектных сечений (рисунок 1) – нисходящие токи направлены на боковые откосы в район углов и раз-

мыв происходит в зонах их встречи с размываемыми границами. Зоны преимущественного отложения наносов совпадают с областью восходящих токов (Рисунок 1а). В сформированных в процессе эксплуатации устойчивых руслах нисходящие токи винтовых течений направлены на горизонтальное дно и от основания откоса к урезу воды (Рисунок 1б).

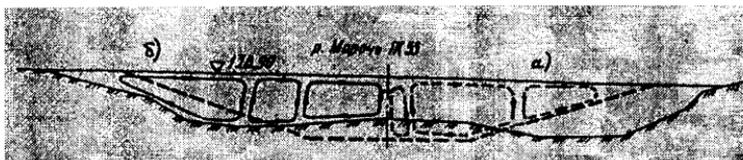


Рисунок 1 – К объяснению деформаций русла р.Морочь  
(данные Белгипроводхоза)

- а) проектное русло  
 ----- — проектное сечение;  
 - - - - - — направление расчетных винтовых течений;
- б) существующее устойчивое русло  
 // // // — существующее сечение;  
 - - - - - — направление расчетных винтовых течений

Таким образом, при гидравлических расчетах устойчивых русел земляных каналов по методу допускаемой средней скорости или влекущей силы (касательного напряжения) условие  $V_{ср} < V_{доп}$  ( $t_{ср} < t_{доп}$ ) является необходимым, но не достаточным для обеспечения устойчивости сечения. Русло должно иметь такие параметры, при которых области максимальных придонных скоростей и касательных напряжений находятся на горизонтальном дне, а винтовые течения направлены от основания откоса к урезу воды.

Расчеты с помощью математической модели позволяют определить параметры сечения устойчивого земляного канала. При заложение откоса  $m > 4$  и параметре формы  $2B_1/H_0 > 17$  максимальные придонные скорости имеют место на горизонтальном дне и осредненное винтовое течение имеет направление от основания откоса к урезу, т.е. будет способствовать повышению устойчивости откоса. Полученные значения параметров предельно-устойчивых русел удовлетворительно согласуются с расчетными данными, полученными по гидроморфологическим зависимостям [1].

## **Выводы:**

1. При гидравлических расчетах прямолинейных участков русел земляных каналов необходимо учитывать существование в потоке стационарных винтовых течений, вызванных анизотропностью распределения по сечению турбулентных напряжений Рейнольдса. Условие  $V_{\text{ср}} < V_{\text{доп}}$  ( $t_{\text{ср}} < t_{\text{доп}}$ ) является необходимым, но не достаточным для обеспечения устойчивости русла. Требуется учитывать направление винтовых течений, которое зависит от достаточно многих параметров.

2. Математическая модель трехмерного поля осредненных скоростей в трапецеидальных руслах с переменной по периметру шероховатостью [5, 6] позволяет гидродинамически обосновать параметры устойчивого русла земляного канала.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. - М.: Колос, 1979. – 256 с.
2. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых потоков. – М. Изд. литературы по строительству, 1969. – 464 с.
3. Шнипов Ф.Д. Трехмерная кинематическая структура потока в трапецеидальных руслах. – Гидротехническое ст-во, 1989, № 9. – С. 48-52
4. Ghosh, S.N., Roy, N. Boundary shear distribution in open channel flow. – J. Hydraul. Dif. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1970, vol. 96, № 4. – Pp. 967-994
5. Rogounovich, V.P., Schnipov, F.D. Calculation of crossflows in straight rectangular and trapezeidal ducts with variable peripheral roughness // 21-th Congr. Intern. Assoc. Hudraul Res. (Melbourne). – 1985, vol. 2. – P. 64-69.
6. Шнипов, Ф.Д. К расчету трехмерного поля осредненных скоростей в однородных по длине потоках трапецеидального сечения. – В кн. Водное хозяйство и гидротехническое ст-во, 1985, № 14 – С. 76-81.

В.В. Ларьков (БГСХА, г. Горки)

## **ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ОБЪЕМНО-ФИЛЬТРУЮЩИХ ОТСТОЙНИКОВ**

### **Актуальность вопроса**

При строительстве, реконструкции и эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов требуется соблюдение природоохранных мероприятий [1-6].

Для уменьшения природной и антропогенной нагрузки на водосточники проводят различные мероприятия на водосборе, на самих водотоках и в прибрежной зоне водоемов. Природоохранные мероприятия на водосборе включают: прекращение или снижение сбросов бытовых стоков промышленных и сельскохозяйственных предприятий; создание и использование экологически безопасных технологий транспортировки, хранения и внесения удобрений; более полная и глубокая утилизация животноводческих стоков, соблюдение культуры земледелия на склонах и прибрежных участках водосбора. Целесообразно сохранение или создание на водосборе лесных зон или полос площадью до 30%, а также болот до 10%.

Особая роль и значение в этом экологическом комплексе отводится охране и восстановлению водных объектов – искусственных и естественных водоемов и водотоков.

Водоохранные мероприятия на самих водотоках должны способствовать интенсификации процесса самоочищения. Для этих целей наиболее широко используют отстойники. На малых водотоках: – мелиоративных каналах, малых реках применяют простейшие типы отстойников в виде уширенного и углубленного русла или прокопа, а также сооружения с природными «фильтрами» – биоплато, биопруды. В биоотстойниках в качестве «фильтра» применяют высшую водную растительность: камыш озерный, роголистник, тростник обыкновенный и др.

Предложен ряд методов расчетного и проектного обоснования простейших отстойников для малых водотоков. Так в работе [6] на мелиоративных каналах рекомендуется применять отстойники с

параметрами выемки в плане 15×15 метров с углублением ниши дна канала на 0,3 м, а биологические пруды (биоплато) - площадью 1,5-5 га, с отношением длиной стороны к ширине 4:1 и глубиной 0,5-2 м [5].

Отстойники для очистки животноводческих стоков еще более сложны. Есть рекомендации по их конструктивному решению, которые включают: несколько ступеней очистки: с использованием сточного канала длиной 1-2,5 км; или каскада прудов от 3 до 5 га (длиной 0,3-0,5 км и шириной 0,06-0,1 км).

Использование сточных каналов требует значительных объемов земработ и больших по протяженности участков местности. При этом отсутствует действенный механизм управления качеством очистки.

Биопруды и биоплато – достаточно сложные инженерно-биологические объекты, т. к. необходимо создание фильтрующей подготовки, дренажных устройств, посадки высшей водной растительности, периодическая их замена и восстановление требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат.

Поэтому поиск более совершенных экономичных решений гидроэкологической проблемы является весьма актуальным.

### **Программа и методика проведения исследований**

В данной работе рассматривается полевой русловой отстойник, в котором в качестве фильтрующего наносозадерживающего материала (фильтра) используется природный материал – хвойные ветки и вершины с толщиной древесины меньше 3 см. Возможность его применения составляет предмет наших исследований.

Фильтрационные характеристики любого материала определяются, как правило, опытным путем. Ввиду отсутствия таких данных по хвойному фильтру были выполнены комплексные лабораторные его исследования.

Программой исследований предусматривалось:

– определить коэффициент фильтрации в зависимости от пористости материала,  $K_{\phi} = f(n)$ ;

– определить пористость фильтра в зависимости от его плотности,  $n = f(\gamma_{\phi})$ , кг/м<sup>3</sup>;

– оценить наносоудерживающую способность хвойного фильтра через плотность наносов (заиления),  $\gamma_n = \varphi(n; \gamma_\phi)$ .

Опыты проводились в лаборатории Мелиорации и в лаборатории Использования водных ресурсов БГСХА на экспериментальной фильтрационной установке в состав которой входит: прибора Дарси, бак для суспензии с микровертушкой, дополнительные фильтры-отстойники, система водоподвода и водоотведения, водомерные устройства.

Для приготовления мутного потока (суспензии) использовался илстый (озерный) грунт и мелкозернистый песок.

Коэффициент фильтрации естественного материала определялся для образцов разной плотности,  $\gamma_\phi$ . Для каждой пробы бралась навеска хвойного материала  $P_\phi$ . Зная измеренный рабочий объем камеры  $W$  отстойника (прибора Дарси) вычислялась начальная плотность фильтра:

$$\gamma_\phi = \frac{P_\phi}{W_\kappa} \quad (1)$$

Фильтрационный материал равномерно загружался в контейнер, изготовленный из нетканого материала (пропилена), а затем помещался в рабочую камеру. Подготовленный таким образом прибор подключался к водоподаче, отстойнику холостого сброса и водоотводу.

Коэффициент фильтрации определялся с использованием зависимостей:

$$k_\phi = \frac{Q}{\omega I}; \quad (2)$$

$$I = \frac{\Delta H}{\Delta L}, \quad (3)$$

где  $Q$  – измеренный расход, л/с;  $\omega$  – площадь поперечного сечения фильтра (цилиндра), см<sup>2</sup>;  $\Delta H$  – разность уровней в верхнем и нижнем пьезометрах, см;  $\Delta L$  – расстояние между пьезометрами, см.

Определение плотности наносов. Плотность и количество наносов, накопившихся в отстойнике (филт্রে) определялось для двух серий опытов: с филтрами одинаковой по длине (высоте), начальной плотностью филтрующего материала  $\gamma_{\phi} = (const)$ , и филтрами с переменной плотностью. Такая методика была принята для изучения влияния плотности загрузки отстойника филтрующим материалом на интенсивность и степень заиления отстойника, и на его филтрационные характеристики. При изучении и анализе результатов использовались зависимости:

$$\gamma_{\phi} = P_{\phi} / W_{от}; \quad (4)$$

$$\gamma_{ин} = P_{ин} / W_{от}; \quad (5)$$

$$P_{ин} = P_{об} - P_{\phi}, \quad (6)$$

где  $P_{об}$  – масса филтрационного материала ( $P_{\phi}$ ) с наносами;  
 $W_{от}$  – рабочий объём отстойника.

При определении указанных показателей, в качестве исходной принималась естественная влажность хвои. Влажность наносов после опыта доводилась высушиванием до начальной, которая для песчаного грунта, которая была принята 10...12 %, для илистого – 16...18 %.

При проведении опыта из взятой пробы грунта затворялась суспензия с начальной мутностью 250...400 мг/л. Постоянная мутность в накопительной ёмкости (баке) обеспечивалась работой микроэлектровертушкой.

Определение пористости филтра. Для определения пористости исследуемого филтра были использованы зависимости:

$$n = \frac{W_0}{W_{общ}}; \quad (7)$$

$$W_{общ} = W_{\phi} + W_n + W_0; \quad (8)$$

$$W_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{\gamma_{\phi}}; \quad (9)$$

$$W_{н} = \frac{P_{н}}{\gamma_{н}}; \quad (10)$$

$$P_{н} = P_{общ} - P_{\phi}, \quad (11)$$

где  $W_0$  – измеренный объем воды при полном погружении фильтра под мениск;  $P_{общ}$  – общая масса фильтра естественной влажности в воздушно-сухом состоянии, кг;  $P_{\phi}$  – масса фильтрационного материала образца, помещённого в прибор.

При выполнении опытов по определению остаточной (после заиливания) пористости фильтра, опыт проводился по следующему циклу.

Бралась навеска фильтрующего материала  $P_{\phi} = \gamma_{\phi} W_{\phi}$  и погружалась в прибор Дарси, предварительно уложив его равномерно в цилиндрический контейнер равный по размеру цилиндра прибора Дарси. После подготовки прибора к испытанию в него равномерно подавалась суспензия с заданной начальной мутностью. Процесс фильтрации контролировался следующими параметрами: фильтрационным расходом  $Q$ , л/с; показаниями пьезометров  $h_{п}$ ; остаточной мутностью  $P_{ос}$ , кг/л.

Продолжительность опыта определялась по двум показателям – по стабилизации фильтрационного расхода  $Q$ , л/с и по степени кальматизации фильтра. Опыты показали, что эти два показателя тесно связаны друг с другом. Т.е. при резком снижении фильтрационного расхода наблюдалось, как и следует ожидать, резкое повышение уровня в верхнем пьезометре (действующего напора).

### Результаты исследований

Определение коэффициента фильтрации. Коэффициент фильтрации определялся по вышеприведенной общепринятой методике для различной плотности фильтрующего материала.

Опыты проводились с использованием прибора Дарси, мерной колбы, весов, секундомера.

Коэффициент фильтрации определялся по формуле (2).

По результатам опытов были установлены численные значения  $K_{\phi}$ , получены графические и аналитические зависимости.

Опытные данные хорошо аппроксимируют зависимостью

$$K_{\phi} = \frac{0,6}{0,5 + 20\gamma_{\phi}} \quad (12)$$

Определение пористости фильтра. При определении пористости фильтра хвойная масса порционно, после взвешивания, погружалась в мерную колбу, предварительно наполненную до намеченного уровня и объема. После полного погружения каждой порции под свободный уровень воды измерялся общий  $W_{\text{общ}}$  и дополнительный  $\Delta W$  объем (уровень) воды в колбе  $W_{\text{об}}$ .

Опыты проводились с трехкратной повторностью в заданном диапазоне плотности  $\gamma_{\phi} = 0,02 - 0,25 \text{ т/м}^3$ , которая определялась по формуле:

$$\gamma_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{W_{\phi}}, \text{ кг/м}^3, \quad (13)$$

где  $P_{\phi}$  – исходная масса хвойного материала;

$W_{\phi}$  – объем заполнения камеры фильтром.

В ходе опытов установлено, что плотность хвойной массы (частиц) без грубых древесных включений (диаметром менее 3 см) составляет  $\gamma_{\text{хв}} = 0,83 \dots 0,85 \text{ т/м}^3$ .

Пористость загрузки (фильтра) вычислялась по зависимости:

$$n = \frac{W_{\text{б}} - W_{\phi}}{W_{\text{об}}}, \quad (14)$$

где  $W_{\phi}$  – объем фильтрующего материала,  $\text{см}^3$ ;

$W_{\text{об}}$  – объем воды и фильтрующей массы,  $\text{см}^3$ .

Объем фильтра принимался равным  $W_{\phi} = W_{об} - W_{в}$ , где  $W_{в}$  — начальный объем воды в мерном сосуде.

По результатам исследований была установлена взаимосвязь  $n = f(\gamma_{\phi})$ .

Анализ опытных данных показывает, что пористость хвойного фильтра можно вычислять по формуле:

$$n = \left( 1 - 1,15 \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_0} \right), \quad (15)$$

где  $\gamma_{\phi}$  — плотность заполнения отстойника фильтрации материалом, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность наносов в фильтре. Плотность наносов отложившихся в фильтре определялась по вышеизложенной методике. При этом, для возможности практического использования результатов исследований полученные данные обработаны и представлены в виде безразмерных комплексов:

$$\eta_n = f(\eta_{\gamma}); \quad (16)$$

$$\eta_n = \frac{\eta_{отс}}{\eta_{\phi}}; \quad (17)$$

$$\eta_{\gamma} = \frac{\gamma_n}{\gamma_{\phi}}. \quad (18)$$

В результате обработки опытных данных получены графики  $\eta_n = f(\eta_{\gamma})$ . А также аналитические зависимости:

для песчаных наносов

$$\eta_n = 0,95 - 1,52 \operatorname{tg}(\eta_{\gamma})^{\circ}; \quad (19)$$

для глинистых взвесей

$$\eta_n = 0,9 - 1,71tg(\eta_\gamma). \quad (20)$$

Полученные графические и аналитические зависимости являются основой для дальнейшего определения гидравлических и геометрических параметров биоотстойника, для дальнейших исследований и разработки методики проектирования и расчетного обоснования объемно-фильтрующих отстойников.

**Результаты исследований дают возможность сделать следующие выводы:**

1. Аккумулирующая или сорбодерживающая способность  $\gamma_n$  отстойника зависит от плотности хвойного фильтра, физико-механических показателей наносов и температуры жидкости. Начальную плотность фильтра следует принимать в диапазоне  $\gamma_\phi = 0,045 - 0,055$  (0,05) т/м<sup>3</sup>. Для таких фильтров аккумулирующая способность может достигнуть  $\gamma_n = 0,5 - 0,6$  (0,55) т/м<sup>3</sup> при относительной плотности аккумулирующей массы  $\eta_\gamma = 0,55/0,05 = 10 - 12$ .

2. Для завершающего периода работы отстойника, т.е. при  $\eta_\gamma = 10 - 12$  остаточная пористость фильтра составляет  $\eta_n = 0,5 \dots 0,55$ .

3. Полученные данные являются методологической основой для определения физических параметров отстойника и его характеристик. Например, при  $\eta_n = 0,5$ , для илистых наносов  $\eta_{кф} = 0,2$ . Тогда начальная плотность фильтра  $\gamma_\phi = 0,05$  т/м<sup>3</sup> и начальный коэффициент фильтрации  $k_\phi = 0,32$ , а коэффициент фильтрации в конце работы отстойника будет составлять величину  $k_{ф.от.} = \eta_n \times k_\phi$ ;  $k_\phi = 0,2 \times 0,32 = 0,064$  м/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мелиорация и экология: аспекты рационального использования водных и земельных ресурсов сб. н. трудов, БелНИИМиВХ, Минск, 1991. – С. 200.

2. Ларьков, В. В. Полевой биоотстойник для защиты водотоков от взвешенных наносов. Сб. н. Трудов «Влияние природных и ан-

тропогенных факторов на социально-экономические проблемы» Рязанский ГМУ. г. Рязань, 2000. – С. 114-121.

3. Сооружения и способы очистки природных и сточных вод. Сб. н. т. ЛИСИ, Ленинград, 1990. – 94 с.

4. Загрязнение окружающей среды и здоровья населения. Материалы международной научно-практической конференции СГМА, Смоленск, 1994. 269 с.

5. Восстановление и охрана малых рек. Бостон – Лондон / пер. с англ; под ред. К. К. Эдельштейна. – М.: ВО. «Агропромиздат», 1989. – 312 с.

6. Ларьков, В.В. (в соавторстве). Экологический и рыбохозяйственный мониторинг существующих прудов и водохранилищ // Материалы международной научно-практической конференции. Горки: РИО БГСХА, 2001. – С. 238-242.

*УДК 627.82.(088.8)*

В.М. Ларьков (БГСХА, г. Горки)

### **ВОДОСЛИВНАЯ ПЛОТИНА С РЕШЕТЧАТЫМ ВОДОСЛИВОМ НА Р. БЫСТРАЯ (20 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ)**

Водосливная плотина облегченного типа с решетчатой сливной гранью и камерой гашения предложена и исследована в Белорусской сельскохозяйственной академии (В.М. Ларьков А.С. СССР. 1019050). Производственное внедрение конструкции осуществлено в Республике Беларусь по типовому проекту института Белгипроводхоз: "Водосбросы открытого типа на расход воды от 50 до 700 м<sup>3</sup>/с с напором 4-12 м для прудов и малых водохранилищ" (Приказ Минводхоза СССР N 431 от 31.12.1981).

Облегченная плотина новой системы используется в качестве водосброса-водоспуска водохранилищного гидроузла комплексного назначения на р. Быстрая Могилевской области (рисунки 1).

Емкость водохранилища при отметке НПУ – 2 млн. 770 тыс. м<sup>3</sup>; полезная водоотдача из водохранилища – 2 млн. 200 тыс. м<sup>3</sup>; пло-

щадь зеркала при НПУ – 131 га, максимальный напор на сооружение – 8,5 м; расчетный паводковый расход через водосбросное сооружение - 150 м<sup>3</sup>/с.

Водосброс-водоспуск имеет два поверхностных и два донных отверстия шириной по 5 м. Отверстия перекрываются плоскими металлическими затворами с электрифицированными винтовыми подъемниками. Нижний бьеф оборудован водпостом и системой измерения гидродинамических и гидростатических нагрузок на элементы сооружения.

В конструктивном отношении водосливная плотина состоит из напорной стенки- диафрагмы, оголовка-водослива, сливной плиты-решетки, фундаментной плиты, которая со стороны верхнего бьефа имеет удлиненную консоль, а со стороны нижнего бьефа выполнена по типу водобойного колодца. На гребне водосливов установлены плоские металлические затворы, при помощи которых регулируется сброс воды и пропуск плавающих предметов. В напорной стенке-диафрагме имеются донные отверстия для опорожнения водохранилища, пропуска строительных расходов и сброса части паводковых вод. На входе в донные отверстия установлены сорозадерживающие решетки. Между напорной стенкой-диафрагмой, сливной плитой-решеткой и плитой водобоем образуется камера-гаситель.

Плотина такой конструкции обеспечивает сброс воды через гребень, пропуск воды через донные отверстия, а также возможна совместная работа поверхностных и донных отверстий. Гидравлический эффект данной конструкции достигается за счет разделения потока, многократного дробления и соударения струй. Экономический эффект получен за счет сокращения длины водобоя и рисбермы, уменьшения объема тела плотины, рациональности формы и статической модели конструкции.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями определена пропускная способность решетчатого водослива, построенного по координатам Кригера-Офицера. Установлено, что такой водослив, в зависимости от величины (полноты) напора, может работать в вакуумном и безвакуумном режимах. При глубине потока на водосливе, равном профильному напору Нпр, коэффициент расхода  $m = 0,48$ . При напорах на водосливе больше профильного коэффициент расхода увеличивается до  $m = 0,56 - 0,57$ . При подтоплении сливного оголовка со стороны нижнего бьефа вакуумный ре-

жим переходит в безвакуумный. Значения коэффициента подтопления для такого водослива близки к известным, установленным для классических профилей.

Выявлены три режима работы камеры-гасителя: напорный, безнапорный и полупонапорный. Режим работы камеры зависит от высоты плотины, глубины воды нижнего бьефа, величины сбросного расхода, соотношения расходов, пропускаемых поверхностными водосливами и донными отверстиями. Для безнапорного режима работы камеры-гасителя характерно сопряжение бьефов в форме самозатопляющегося прыжка.

При напорном режиме работы камеры-гасителя сопряжение бьефов за решетчатой плотиной может быть в виде совершенного затопленного прыжка, или прыжка волны в виде отогнанного прыжка. Наличие камеры-гасителя и решетчатой сливной грани увеличивает интенсивность гашения кинетической энергии сбросного потока по сравнению с совершенным прыжком плоской задачи на 20-35 %. Это дает возможность соответственно уменьшить размеры водобойного колодца.

Предложенная конструкция плотины дает экономию материала (железобетона 1150м<sup>3</sup>) и денежных затрат на 21 %, сокращает срок строительства.

Строительство водосливной плотины велось в течении 1982-1983 г.г. Наполнение водохранилища началось в 1984г. Пропуск расхода р.Быстрая в период строительства земляной плотины осуществлялся через донные отверстия водосброса, начиная с осени 1983 г.

Характерным является зимний период эксплуатации водосброса.

В этот период один из затворов (левосторонний) был приподнят над бытовым уровнем водотока, а второй был опущен под уровень на глубину 0,6...0,8 м. Поэтому левостороннее отверстие работало как водослив с широким порогом, а правостороннее – в режиме истечения из-под цита.

В районе объекта зима 1983-1984 была сравнительно суровой. Максимальные отрицательные температуры достигали 30...32 °С.

Обследование объекта до таяния льда и наступления паводка показали, что камера-гаситель левостороннего (открытого) пролета полностью покрыта льдом толщиной 0,6-0,8 м. При этом в камере остался вмерзший в лед строительный мусор (бревна, доски и т.д.).

Правосторонний пролет камеры-гасителя, с прикрытым донным отверстием был почти полностью свободен от льда, а перед затвором сохранилась майна шириной 0,3-0,5 м.

Такое состояние объекта можно объяснить "аэродинамическим эффектом" т.е. развитием усиленной циркуляции холодного воздуха через открытое отверстие как через аэродинамическую трубу. Это подтвердилось измерением скорости воздушного потока в этой области при помощи анероида.

При отсутствии ветра скорость воздуха в камере достигала 4...6 м/с, вследствие чего происходило более интенсивное охлаждение и замерзание водного потока в левосторонней части камеры.

С наступлением весенней оттепели лед в камере-гасителе растаял в течении двух суток. А с подъемом воды в верхнем бьефе на 1...1,5 м весь строительный мусор был вынесен потоком из камеры-гасителя.

При натурных испытаниях изучались три основных рабочих случая – пропуск бытового расхода только донным отверстием, только поверхностным отверстием и при совместной работе донных и поверхностных отверстий.

Наблюдения в зимний период выявили еще один четвертый особый случай, характерный для пропуска бытового зимнего стока в автоматическом режиме путем перелива воды через верхнюю кромку (гребень) затворов поверхностных отверстий. Этот режим наблюдался достаточно суровой зимой 1984...1985 г.г. при температуре наружного воздуха до -30...-31гр С. Через водосброс проходил расход от 3 до 5 м<sup>3</sup>/с при толщине сбросной струи на гребне затвора 0,25...0,45 м. При падении струи происходит интенсивная аэрация и дробление потока. По физике явления должно бы произойти обмерзание водослива и балок решетки. Однако природа поступила "мудро". Из замерзшего колодца начался процесс намерзания льда в сторону верхнего бьефа. В результате этого процесса над решетчатой гранью образовался ледяной "козырек", который стал служить термоизоляционным "щитом", предохраняющим сбросную струю от переохлаждения. Между сливным оголовком и ледяным козырьком образуется майна. Она сохраняется в течении всего морозного периода благодаря динамическому и термическому воздействию падающей струи и более теплomu воздушному потоку (пара), восходящему из камеры-гасителя.





Наблюдения за гидравлическим режимом работы водосброса при других эксплуатационных случаях подтвердили адекватность натурных и экспериментальных данных.

В целях стабилизации режима камера-гаситель плотина оборудована воздуховодами. Воздуховоды выполнены из металлических труб  $d = 300\text{мм}$  и установлены в разделительной стенке (быке) и в обоих устоях. Т.е. в каждую камеру воздух поступает с двух сторон. Для более равномерного его распределения по ширине камеры в потолке оголовка сделан распределительный канал. Для замера количества воздуха, поступающего в камеру, входное отверстие воздухопроводов было оборудовано шторной задвижкой, вакууметром и анероидом.

С помощью вакууметра определялся вакуум в камере, возникающий при закрытии воздухопроводов, а с помощью анероидов - измерялась средняя скорость воздушного потока в трубах.

Результаты наблюдений показали, что наибольший вакуум возникает при работе поверхностных отверстий плотины. Максимальное его значение в период наблюдений достигло  $0,3\text{ мм в.ст.}$  При этом скорость воздуха в подводящих трубах составляла  $8,2 \dots 12,5\text{ м/с.}$

При закрытии воздухопроводов в нижнем бьефе появляется раскачка потока, периодически происходило повышение и снижение свободной поверхности (глубины) потока на сливной решетке.

Визуальные наблюдения и инструментальные замеры отводящего русла за плотиной с решетчатым водосбросом показали, что за двадцатилетний срок эксплуатации русло практически не претерпело каких либо существенных деформаций. Это факт весьма существенный, если иметь в виду, что в течение ряда лет через створ проходил достаточно высокий паводок ( $P_{10-15}\%$ -ой повторяемости), а также периодически осуществлялся эксплуатационный незапланированный сброс во время профилактических осмотров затворов и в период проведения натурных исследований. При этом следует отметить, что при натурных испытаниях происходил тяжелый неустановившийся режим движения потока. Максимальный сбросной расход в период натурных исследований достигал проектного (расчетного) значения  $Q = 150\text{ м}^3/\text{с.}$

Установлено, что после всего периода эксплуатации практически сохранился начальный (строительный) профиль русла. Незначи-

тельные деформации (размыв до 1,3 м) наблюдался в русловой части по оси пролета.

Модель водосливной плотины ПРК с неоновым оформлением потока (исполнение Минскинжпроект) демонстрировалась на ВДНХ СССР и получила диплом 2-ой степени и награждена серебряной медалью.

Анализируя полученные данные можно сделать следующие выводы:

1. Двадцатилетний период эксплуатации водосливной плотинной с решетчатым водосливом и камерой гашения подтвердил высокую гидравлическую и экономическую эффективность и надежность в эксплуатации.

2. Решетчатая (сквозная) конструкция водослива обеспечивает интенсивное гашение кинетической и пульсационной энергии потока, способствует равномерному его растеканию без сбоя и отрывных течений при достаточно большом (до  $25^0$ ) угле бокового расщирения стенок водобоя-рисбермы.

3. Результаты натурных измерений величины деформации русла в НБ оказались близкими к модельным, что подтверждает достаточную адекватность физического моделирования русловых процессов на участке сопряжения бьефов по предложенной нашей методике [5].

4. Экономический эффект на одном сооружении составил 25...27%

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения. Под ред. доктора техн. наук, проф. Н.П. Розанова, Москва: Агропромиздат, 1985.

2. Студеничников, В.И. Защита от размыва русла нижних бьефов водосбросов. М.: ВНИИ Водгео, 1974.

3. Мирцхулава, В.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970.

4. Ларьков, В.М. Водопрпускные сооружения низконапорных гидроузлов. Минск: Ураджай, 1990.

5. Ларьков, В.М. Моделирование размыва русла за водосбросными сооружениями с учетом критерия размывающей способности потока. Минск: Вышэйшая школа. Т. 15, 1986.

## **ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ПЕСКОВ КОНТАКТНОМУ СДВИГУ**

Вибрации существенно влияют на контактную сопротивляемость контактному сдвигу по боковой поверхности конструкций взаимодействующих с грунтом. Практически все, существующие в этой области, работы посвящены изучению изменчивости прочностных характеристик грунта под действием вибраций различной интенсивности. Однако до сих пор остается неясным механизм уменьшения мобилизованного контактного сопротивления сдвигу по боковой поверхности анкеров и свай. Существующие приборы и методики испытаний не позволяют контролировать объемные деформации образцов грунта и роль их изменения в процессе сдвига. Для детального изучения данного вопроса проведена серия экспериментов на специальной вибрационной установке.

В состав вибрационной установки входят:

Дилатометрический прибор контактного сдвига ДПКС, разработанный Д.Ю. Соболевским и модернизированный автором применительно к условиям опытов;

- Вибрационная приставка, представляющая собой одноблочный вибратор направленного действия, приводимый в действие электродвигателем постоянного тока варьирующего частоту вращения при помощи выпрямителя в диапазоне до 5000об/мин;

- Измерительная система, включающая бесконтактный радиоволновой тахометр РВТ-0022 предназначенный для измерения частоты колебаний в диапазоне 3.316665 Гц и измерителя шума и вибрации ВШВ-003-М2 с комплектом пьезометрических датчиков.

ДПКС состоит из плиты 1 на которой расположены винтовой домкрат 2 для приложения сдвигающего усилия подвижной нижней каретке 3 на подшипниках 12, имеющую съемную пластину с гофрированной поверхностью для наклейки зерен исследуемого грунта, посредством динамометра 4; стойки 5 для крепления верхней обоймы 6 с образцом грунта и рамы 7 для винтового домкрата 8 прикладывающего нормальное давление через поршень конической формы посредством динамометра 9. Перемещение каретки 3 контролирует-

ся при помощи индикатора часового типа с точностью 0.01 мм. Горизонтальные колебания в плоскости сдвига создаются вибратором направленного действия смонтированного на плите 10 и состоящего из горизонтальной подвижной каретки 11 скользящей на подшипниках 13 по направляющим обоймам 14, ограничивающих вертикальные перемещения каретки 11 с помощью стоек [5]. Подвижная каретка 11 состоит из вала 16 вращающегося на подшипниках, смонтированных в корпус каретки 11. На валу имеются две соосно расположенные шпильки 17 с резьбой, предназначенной для навинчивания дебалансных масс 18. Вращение вала сообщается электродвигателем посредством гибкого вала. Передача вибрации рабочей каретке 3 по оси действия статического сдвигающего усилия осуществляется и помощью соединительного элемента 19. На каретке 3 расположены два пьезометрических датчика 20 предназначенных для записи виброскорости и виброускорения ее колебаний. Амплитуда колебаний каретки вычисляется по известным значениям виброскорости, виброускорения и частоты колебаний. Изменение кинематических параметров колебаний каретки достигается изменением жесткости динамометра прикладываемого статическое сдвигающее усилие и величины центробежной силы инерции за счет изменения частоты вращения вала и положения дебалансных масс относительно оси вращения вала. Кроме того очень хорошую сходимость при колебаниях с частотой до 40 Гц дает непосредственное визуальное измерение размаха колебаний по показаниям индикаторов часового типа. При колебаниях образуется черный сектор с ярко выраженными границами. Индикатор часового типа, установленный в динамометре, работающем на сдвиг, показывает также величину изменения статического сдвигового усилия.

Было проведено три серии испытаний. Первая серия статических испытаний проводилась следующим образом. К образцу грунта с площадью сдвига  $100 \text{ см}^2$  через динамометр 9, соответствующий коэффициенту упругого отпора грунта  $K = 282 \text{ МН/м}^3$ . После затухания деформаций сжатия к рабочей каретке 3 посредством динамометра 4 прикладывалось сдвигающее усилие. Скорость сдвига составляла 0,5 мм/мин.

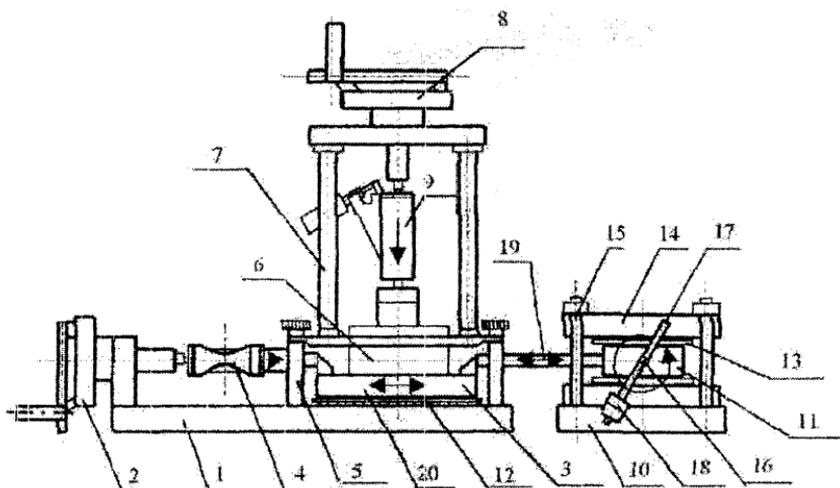


Рисунок 1 – Установка для исследования влияния вибраций на сопротивляемость грунтов контактному сдвигу

Таблица 1 – Физико-механические свойства исследованных песков

Плотность г/см <sup>3</sup>	Коэффициент пористости, e	Удельное сцепление C, кПа	Угол внутреннего трения φ, град.	Показатель плотности
19.32	0.44	0	37.34	1

В процессе опыта регистрировались: изменение нормального давления на плоскость сдвига, вследствие развития объемных деформаций, величина сдвигающей силы и соответствующая ей величина сдвигового перемещения, вертикальные деформации образца. Повторность опытов, с начальными нормальными давлениями 0,1; 0,2; 0,3 МПа, трехкратная. На рисунках 2 и 3 (кривая 1) представлены результаты испытаний при нормальном начальном давлении равным 0,2 МПа.

Вторая серия экспериментов с вибрацией, прикладываемой в плоскости сдвига посредством вибрационной приставки, проводи-

лась в такой же последовательности, как и при статических испытаниях. До начала сдвига рабочей каретке прибора задавался определенный режим колебаний. Затем проводился сдвиг с сохранением заданного режима. Данные испытаний для нормального к плоскости сдвига давления равного 0,2 МПа приведены на рисунках 2 и 3.

Третья серия испытаний была посвящена определению критического ускорения колебаний для заданных величин мобилизованного контактного сопротивления сдвигу и начального нормального давления. Эксперимент проводился в следующей последовательности. Задавались начальные величины нормального и сдвигового усилия. Затем, плавно увеличивалось ускорение колебаний за счет изменения частоты со скоростью 5 Гц/мин и фиксировался момент, при котором начиналось интенсивное развитие деформаций сдвига и падение сдвигового усилия. Кинематические параметры колебаний каретки, соответствующие этому моменту, принимались за критические, для данного напряженно-деформированного состояния грунта. Результаты испытаний при нормальном давлении в 0.2 Мпа представлены на рисунке 4.

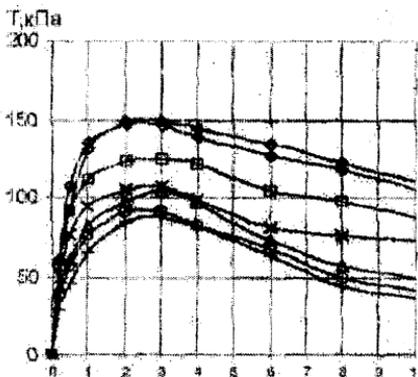


Рисунок 2 – График зависимости "касательное напряжение - сдвиговое перемещение"

- ◆— кривая 1
- $w=5\Gamma\text{ц}, n=0,003\text{м/с}^2$
- $w=10\Gamma\text{ц}, n=0,021\text{м/с}^2$
- ×—  $w=20\Gamma\text{ц}, n=0,178\text{м/с}^2$
- ▲—  $w=30\Gamma\text{ц}, n=0,3\text{м/с}^2$
- $w=40\Gamma\text{ц}, n=0,67\text{м/с}^2$
- †—  $w=60\Gamma\text{ц}, n=2,8\text{м/с}^2$

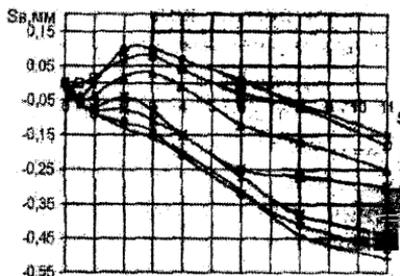


Рисунок 3 – График зависимости "Дилатантное перемещение  $S_B$  - сдвиговое перемещение  $S_r$ "

- ◆— кривая 1
- $w=5\Gamma\text{ц}, n=0,003\text{м/с}^2$
- ▲—  $w=10\Gamma\text{ц}, n=0,021\text{м/с}^2$
- ×—  $w=20\Gamma\text{ц}, n=0,178\text{м/с}^2$
- \*—  $w=30\Gamma\text{ц}, n=0,298\text{м/с}^2$
- $w=40\Gamma\text{ц}, n=0,673\text{м/с}^2$
- †—  $w=60\Gamma\text{ц}, n=2,83\text{м/с}^2$

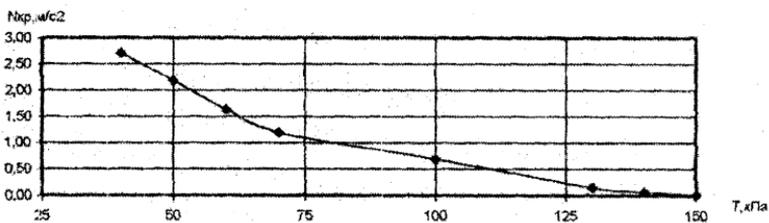


Рисунок 4 – График зависимости "Мобилизованно контактное сопротивление  $T$  – критическое ускорение  $N_{кр}$ "

На основании данных исследований сделаны следующие выводы:

1. После достижения предельного контактного сопротивления сдвигу происходит его уменьшение вследствие уменьшения дилатантного распора к плоскости сдвига. Таким образом, наличие пикового сопротивления сдвигу в песках обусловлено тем фактом, что дилатансия по мере развития сдвигового перемещения сменяется контракцией.

2. Мобилизации предельного контактного сопротивления сдвигу соответствует определенный диапазон сдвиговых перемещений (для песчаных грунтов 2.6-3.3 мм), независящий от величины действующего, нормального к плоскости сдвига, давления;

3. После достижения предельного сопротивления сдвигу, на нисходящем участке кривой зависимости "мобилизованное контактное напряжение - сдвиговое перемещение", отношение мобилизованного контактного сопротивления сдвигу к соответствующему ему нормальному напряжению остается постоянным и численно равным коэффициенту внешнего трения, определенному стандартным методом. Величина указанного коэффициента зависит от интенсивности вибраций.

4. Снижение величин мобилизованного контактного сопротивления сдвигу при вибрациях по сравнению со статическими значениями обусловлено двумя факторами:

- более интенсивной контракцией пограничного слоя грунта и снижением дилатантного распора;
- изменением коэффициента внешнего трения грунта.

5. Величина критического ускорения колебаний определяется как величиной нормального к плоскости сдвига давления, так и величиной мобилизованного контактного сопротивления сдвигу. При достижении предельного сопротивления сдвигу достаточно незначительных по интенсивности вибраций, чтобы проявилось интенсивное снижение мобилизованного значения сдвигового напряжения и развитие сдвигового перемещения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Д. Красников. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л., Издательство литературы по строительству, 1970.

*УДК 504.43*

О.Б. Корбут, Хусейн Сафаа (БНТУ)

### **ВОЗМОЖНОСТЬ УМЕНЬШЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЛОКАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ**

Развитие индустриального общества неизменно сопровождается загрязнением окружающей среды, К концу двадцатого столетия уровень загрязнения воды существенно повысился.

Из всех компонентов окружающей среды лишь вода является незаменимым продуктом природы. Чистая вода необходима для обеспечения жизни людей, животных, растений, для всех видов хозяйственной и промышленной деятельности человека.

Проблемы сохранения флоры и фауны, здоровья и жизни людей, обеспечения пресной водой промышленности и сельского хозяйства приобрели всеобщий, глобальный характер.

Снабжение населения чистой, доброкачественной водой в достаточном количестве является неременным условием обеспечения гигиены, предохраняет людей от всевозможных эпидемических заболеваний. Даже во многих промышленно развитых странах уже ощущается недостаток чистой воды, пригодной для потребления, поэтому питьевая вода становится стратегическим сырьем.

Одним из основных источников пресной воды на Земле являются подземные воды. В республике Беларусь около 70 % воды добывают из подземных источников, что требует особо пристального внимания к их охране.

Загрязнение подземных вод происходит вследствие различных антропогенных факторов, прежде всего, утилизации промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов – это создание захоронений радионуклидов, пестицидов и других вредных химических элементов, полигонов бытовых отходов, отведение стоков от

животноводческих комплексов. Все чаще случаются аварии на нефтепродуктопроводах. В Беларуси одним из основных источников загрязнения подземных вод являются жидкие отходы производства калийных удобрений.

Проникая в почву, загрязнения из неизолированных источников мигрируют в грунтовые, а затем в подземные воды, водотоки и водоемы.

Такие загрязнения, сосредоточенные в одном месте, носят локальный характер и, изолировав их, можно было бы уменьшить их распространение и тем самым ущерб от воздействия на почву и подземные воды.

Однако, оградить захоронения гидроизоляцией практически невозможно, поэтому пути поиска решений по уменьшению отрицательного воздействия загрязнений подземных вод сводятся к уменьшению зоны их распространения, например, гидравлическим путем [1].

Вследствие уклона уровня грунтовые воды фильтруют через захоронение, насыщаются в нем загрязнениями и далее мигрируют в подземные воды и в различные водные объекты.

В процессе миграции загрязнений основным является конвективный перенос фильтрующими водами, тогда как перенос за счет молекулярной диффузии на несколько порядков меньше. Для уменьшения конвективной составляющей переноса загрязнений необходимо создать в районе захоронения такие гидравлические условия, чтобы градиент уклона грунтовых вод в окрестностях захоронения был близок к нулю, что существенно уменьшило бы фильтрацию воды через захоронение.

Такое предложение содержится в патенте "Способ гидравлической изоляции грунтовых вод в зоне могильника загрязнений" [2].

По периметру захоронения (рисунок 1) устанавливаются перфорированные трубы, соединенные внизу между собой горизонтальной сплошной трубой. Созданная таким образом система дренажа работает как система сообщающихся сосудов, обеспечивая для грунтовых вод условия, при которых их уровень будет автоматически горизонтальным, а уклон практически нулевым.

В результате исчезает первопричина движения грунтовых вод, поскольку градиент давления близок к нулю, и существенно уменьшается фильтрация грунтовых вод, а следовательно, и мигра-

ция загрязнений из захоронения. Вместе с тем в захоронениях происходят химические и биологические процессы, за счет которых захоронение с течением времени самоочищается и исчезает как источник загрязнения.

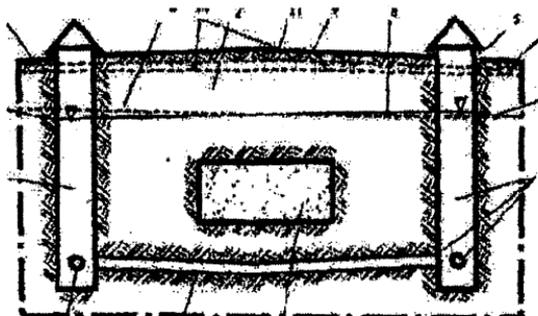


Рисунок 1 – Схема гидравлической изоляции

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рогунович, В.П. Локальные источники загрязнений вод и технология уменьшения горизонтальной миграции в грунты / сб. докладов 7 Международного конгресса "Вода: экология и технология" ЭКВАТЭК-2006, ч. 1. – М., 2006 – С. 188-189.

2. Способ гидравлической изоляции грунтовых вод в зоне могильника загрязнений: пат. 11137 Респ. Беларусь, МПК (2006) E 02 D 31/00, E 02 D 19/00 / В.П. Рогунович; заявитель Рогунович В.П. – № а. 20021044; заявл. 19.12.2002; опубл. 2004.06.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 5. – С. 108.

Научное издание

**ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО  
И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

Республиканский межведомственный сборник научных трудов

---

Подписано в печать 15.03.2010.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 15,29. Уч.-изд. л. 11,95. Тираж 100. Заказ 245.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.