

Российский государственный аграрный университет –  
МСХА имени К.А. Тимирязева

Министерства сельского хозяйства Российской Федерации

*Посвящается 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,  
памяти Н.И. Железнова – первого ректора Петровской  
земледельческой и лесной академии*

## **Проблемы управления водными и земельными ресурсами**

Материалы Международного научного форума, Москва,  
30 сентября 2015 г.

Часть 3

Москва  
Издательство РГАУ-МСХА  
2015

УДК 504.4.062.2  
ББК 20.1  
ПЗ1

*Редакционная коллегия*

д.т.н., проф. Д.В. Козлов (гл. редактор);  
к.т.н., доцент А.С. Апатенко;  
д.т.н., проф. Г.Х. Исмаилов;  
к.т.н., проф. Л.Д. Раткович;  
д.т.н., проф. В.В. Пчелкин;  
д.т.н., проф. Ю.И. Сухарев;  
д.т.н., проф. Н.В. Ханов;  
д.т.н., проф. В.Я. Жарницкий.

**Проблемы управления водными и земельными ресурсами.**  
Материалы Международного научного форума. В 3-х ч. Ч. 3.  
Москва, 2015 г. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015. 278 с.

В сборнике представлены материалы Международного научного форума «Проблемы управления водными и земельными ресурсами», прошедшего в Москве 30 сентября 2015 г. и организованного Российским государственным аграрным университетом – МСХА имени К.А. Тимирязева.

В материалах научного форума представлены результаты исследований по обеспечению водными ресурсами устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации; мониторингу, восстановлению и экологической реабилитации водных объектов; управлению земельными ресурсами; проблемам сохранения и восстановления плодородия почв, развитию мелиорации сельскохозяйственных земель в нашей стране, а также безопасности гидротехнических сооружений и предупреждению чрезвычайных ситуаций на водных объектах.

Предназначено для преподавателей и научных сотрудников, аспирантов и студентов вузов, а также специалистов агропромышленного и водохозяйственного комплексов.

ISBN 978-5-9675-1299-5

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА  
имени К.А. Тимирязева, 2015

**О ВЛИЯНИИ ГРУНТА – ЗАПОЛНИТЕЛЯ  
НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ДЕФОРМАЦИИ  
ПРИ ИЗГИБЕ ЯЧЕЙСТОЙ КОНСТРУКЦИИ  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ**

*Бахтин Б.М. доктор технических наук, профессор  
Шарков В.П., кандидат технических наук, доцент*  
ФГБОУ ВПО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ РГАУ-МСХА ИМЕНИ К.А.ТИМИРЯЗЕВА»  
г. Москва, Россия

Аннотация

Работа посвящена исследованию влияния грунта-заполнителя в ячеистых конструкциях гидротехнических и других сооружений на их изгибные деформации и напряженное состояние.

Для решения поставленной задачи авторы провели опыты на модели и использовали расчетное обоснование.

В работе выявлено, что для модельных условий грунт-заполнитель при изгибе одноячейковой модели, заделанной в основание, активно участвует в сопротивлении изгибу. При этом сопротивление модели ячейки с грунтом, напрямую влияющее на величины прогибов её свободного конца, практически равноценно сопротивлению пустой ячейки, имеющей на 30 % большую толщину стенки (при неизменных наружных габаритах сечения ячейки).

Учет сопротивления грунта-заполнителя в расчетном обосновании таких сооружений может уменьшить толщину стенок ячеистого каркаса.

Авторы считают необходимым продолжить исследование применительно к натурным условиям работы сооружений рассматриваемого типа.

Ключевые слова: ячейка, грунт-заполнитель, модель, заделка, опыт, изгиб, прогибы, напряжения.

Как известно, одним из основных требований, предъявляемым к любому гидротехническому сооружению, является обеспечение его прочности. Этого условия предполагает превышение возникающих в рассматриваемой

## ОБРАЗОВАНИЕ ЗАТОРОВ ЛЬДА НА РЕКАХ БАССЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ<sup>1</sup>

С.А. Азафонова\*, А.Н. Василенко\*, Д.В. Козлов\*\*, Н.Л. Фролова\*  
\*МГУ имени М.В. Ломоносова, \*\*РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева  
г. Москва, Россия

**Аннотация.** На примере наиболее проблемных участков рек бассейна р. Северная Двина рассмотрены современные особенности заторобразования, характеризующиеся сложным сочетанием меняющихся климатических условий и антропогенного воздействия.

**Summary:** Specific features of ice jam in rivers of the Northern Dvina Basin over last years are analyzed. These features were observed due to expected climate change and economic activity.

Исследование ледового режима рек – важная научная и практическая задача ввиду особенностей географического положения и климатических условий нашей страны. Со сроками и продолжительностью ледовых явлений связаны многие виды хозяйственной деятельности – условия навигации, нормальное функционирование гидротехнических сооружений и др. Во многих случаях ледовыми явлениями обусловлены опасные гидрологические процессы. Среди них особое место занимают заторы льда. Скопления льдин в русле при заторах вызывают подъем уровней воды и наводнения. Нередко заторные уровни воды превышают максимальные уровни половодья. Заторные наводнения особо опасны тем, что происходят в холодное время года и сопровождаются выходом на берег льда, который разрушает расположенные в пределах зоны затопления

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-31278 мол\_а) и Российского научного фонда (проект № 14-37-00038)

состояние конструкции. Видимо, при этом здесь должно быть учтены такие факторы, как навал грунта на стенки при изгибе конструкции.

В реальных сооружениях ячеистой конструкции, выполняемых из бетона и заполняемых грунтовыми материалами (песком, гравием и др.) отношение модулей упругости бетона и грунтов может быть значительно больше, чем в нашем опыте, что может дать результаты, отличающиеся от полученных. Это представляет и научный и практический интерес.

На основе исследований на модели можно сделать следующие выводы:

1. Грунт –заполнитель в ячеистой конструкции при изгибных деформациях на модели ведет себя как упругое тело, работа в упругой стадии и реализуя свой модуль упругости. Это объясняется малыми деформациями модели в опытах, составляющим примерно  $1/28000$  от её высоты.
2. Не учет в расчетах прогибов сопротивления грунта – заполнителя при изгибных деформациях модели приводит к повышению толщины стенки ячеистого каркаса на 30%.
3. В дальнейших исследованиях следует изучить этот вопрос применительно к другим материалам заполнителя и каркаса, в том числе моделирующих натурные условия работы сооружения

сооружения. Ущерб, причиняемый заторами льда, как правило, намного превышает ущерб от наводнений в период свободной ото льда реки [Бузин, 2004].

Заторы являются важной особенностью ледового режима рек, текущих с юга на север. Если процесс вскрытия распространяется от верхнего течения к нижнему, то заторы в период вскрытия формируются ежегодно, но не всегда ведут к бедствию. Задерживая лед и давая тем самым возможность рассредоточиться ледовым массам ниже по течению, они в какой-то мере нормализуют ледоход. При большом количестве ледового материала в бассейне после суровой зимы заторы образуются в верховьях рек и, при благоприятных погодных условиях, задерживают процесс вскрытия, пока реки не освободятся ото льда на достаточном протяжении. При малом количестве льда – остановка ледяных полей происходит значительно ниже по течению. Распределение мест образования заторов по длине реки зависит также от водности в период вскрытия. Мощная волна половодья проталкивает лед на большее расстояние, и заторы образуются ниже по течению, чем в годы с низкой водностью.

В данной работе рассмотрены особенности образования заторов льда на р. Северная Двина и ее главных притоках (рр. Сухона и Вага) за период с 1936 по 2015 гг. Проведено сравнение двух периодов: до и после 1975 г. Наиболее подробно проанализированы последние 15 лет.

На р. Северная Двина заторы обычно формируются на участках вблизи г. Великий Устюг, г. Котлас, с. Двинский Березник, д. Орленцы, с. Холмогоры. Вблизи первых двух городов заторообразованию способствуют резкое уменьшение уклона водной поверхности, наличие островов и резких поворотов русла или коренного берега; у д. Орленцы – необычно крутой поворот реки и сужение русла; в районе Холмогор – разделение реки на многочисленные

мелководные рукава и наличие нескольких резких поворотов основного русла, у которых лед при подвижках упирается в коренной берег. На р. Сухона заторы льда образуются обычно у островов Еловец, Осовой, Дедов и на крутых поворотах реки у деревень Двиницы, Мотыри, Черновские, Селище, Опоки. Нередки они и в устье реки у г. Великий Устюг. Заторы в устье обычно являются хвостовым продолжением упоминавшихся выше северодвинских заторов, но иногда голова затора устанавливается на р. Сухона перед её слиянием с р. Юг. Последнее характерно для лет, когда р. Юг, вскрываясь одновременно или несколько раньше р. Сухоны, создает сильный подпор на устьевом участке и препятствует поступлению сухонского льда в р. Северная Двина. Заторы льда постоянно образуются на р. Юг в месте ее круглого поворота у с. Стрелка, в 12 км выше устья [Русловые..., 2012].

Ледовый режим бассейна р. Северная Двина достаточно изучен, ежегодно привлекаются значительные силы и материальные средства для предотвращения образования заторов льда, мониторинг прохождения весеннего ледохода осуществляется как на сети постоянного действующих, так и временных гидрологических постов, с 2009 г. также используются данные космических снимков. Но ледовые проблемы для данной территории остаются до конца не решенными: ущербы судоходных компаний, из-за сокращения периода навигации при длительных заторах, повреждение опоры Котласского автомобильного моста при зимнем вскрытии 2006 г., заторное наводнение 2013 г. в районе г. Великий Устюг и т.д.

Организация мониторинга и разработка противозаторных мероприятий в рамках исследуемой территории осложняется наблюдаемыми изменениями ледового режима, связанными, в том числе и с меняющимися климатическими условиями.

Изменение характеристик ледового режима в период вскрытия заключается в сдвиге средних сроков первой подлвки, начала ледохода и очищения к более ранним на 1–3 дня. Смещение средних сроков происходит из-за роста повторяемости экстремально раннего начала весенних ледовых процессов. При экстремально раннем вскрытии увеличивается вероятность резкого похолодания, при котором возрастает прочность льда, снижаются уровни воды, стабилизируются уже образовавшиеся заторы.

Для лет, когда вскрытие происходит в сроки, близкие к среднемноголетним, наблюдается четкая тенденция уменьшения продолжительности продвижения фронта вскрытия и очищения, например по р. Сухона. Одновременное вскрытие протяженных участков увеличивает вероятность образования мощных заторов.

В последние годы по всей Европейской территории России наблюдается тенденция снижения расходов воды в период весеннего половодья. В бассейне р. Северная Двина, начиная с 2000 г. все чаще весенний ледоход проходит при низких расходах воды. Очищение ото льда в такие годы затягивается, что сокращает и без того непродолжительный период навигации [Агафонова, Фролова, 2009].

Важным фактором современного заторообразования на рр. Сухона и Северная Двина является антропогенное воздействие. Речь идет, прежде всего, о противозаторных мероприятиях (ледорезных и взрывных работах, сбросе теплых сточных воды), объем которых с каждым годом растет.

На р. Малая Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас ледорезные работы с чернением пропиллов проводятся ежегодно. Но повторяемость заторов ниже г. Великий Устюг не снижается, как и не снижаются максимальные заторные уровни воды и их заторные составляющие (рис. 1, 2). В работе [Бузин и др., 2014]

подтверждено отсутствие статистически значимых изменений в многолетнем ряде максимальных заторных уровней воды р. Сухона у г. Великий Устюг.

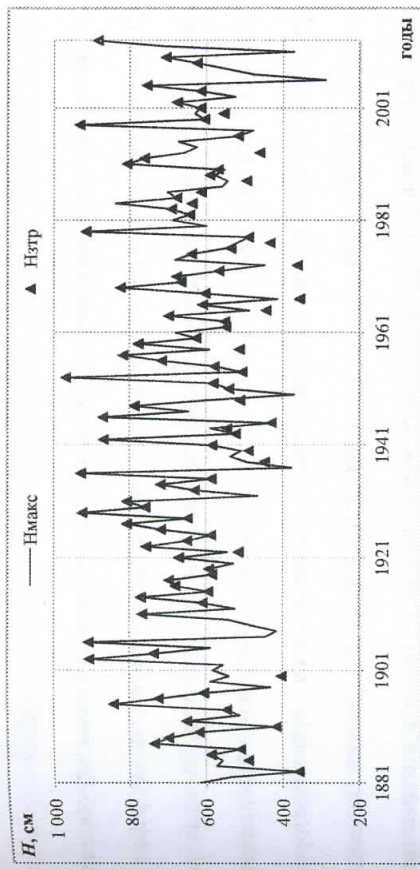


Рис. 1. Изменение максимальных уровней воды р. Сухона в районе г. Великий Устюг в период весеннего ледохода ( $H_{\max}$ ) и в период образования заторов льда ( $H_{\text{льда}}$ ) (Отметка «нуля» графика поста 49,34 м БС)

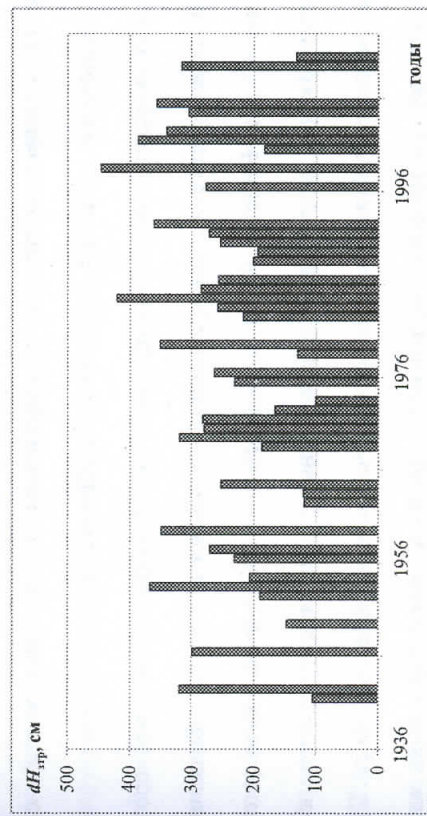


Рис. 2. Изменение заторной составляющей максимальных заторных уровней воды ( $dH_{\text{зат}}$ ) р. Сухона у г. Великий Устюг

Для защиты г. Котлас осуществляется сброс теплых сточных воды ТЭС 1 Котласского ЦБК для образования протяженной поймы. Затопы не образуются на довольно протяженном участке, но ежегодно образуются у кромки поймы в районе гп Телегово.

На сегодняшний день оценки эффективности противопаводковых мероприятий на реках России расходятся. Огромные объемы ледорезных и взрывных работ не снижают повторяемость паводков наводнений. Следует отметить, что для рек, текущих с юга на север невозможно обеспечить беззатопное прохождение весеннего ледохода от истока до устья. Планирование противопаводковых мероприятий должно быть организовано только в рамках всего речного бассейна в целом. Необходимо пользоваться возможностью предотвращать затопы ниже крупных населенных пунктов, допуская образование затопов в относительно «безопасных» местах. Затопы в районе гп Каликино на р. Сухона защищают г. Великий Устюг ниже по течению. Затопы в Орлецах позволяют р. Северная Двина ниже по течению достаточно «подготовиться» к вскрытию, в этом случае катастрофические затопы у г. Архангельск не образуются.

Среди населенных пунктов, для которых весенний ледоход проходит максимально сложно, стоит выделить г. Великий Устюг. Большинство наводнений в г. Великий Устюг за всю историю наблюдений имело затопный характер. Затопы, влияющие на максимальные уровни воды у города, обычно формируются на протяженном перекальном участке ниже узла слияния рр. Сухона и Юг. Фактически это первое по течению речной системы место, где созданы все условия для образования затопов. С этим связана особая важность создания эффективной методики прогнозирования максимальных затопов уровней воды на этом участке.

Существующие методики прогноза максимальных затопных уровней, в том числе и для р. Сухона у г. Великий Устюг, основаны на эмпирических зависимостях [Бузин, 2010, Агафонова, 2006]. Но в настоящее время погрешность прогнозов по таким методикам увеличилась [Бузин и др., 2014]. Главная причина – меняющиеся условия прохождения весеннего ледохода: климатические изменения, возрастающие объемы противопаводковых мероприятий, снижение ледопротускиной способности русла из-за прекращения дноуглубительных работ.

В данной работе проведена попытка составления схемы прогноза максимальных затопных уровней воды р. Сухона в районе г. Великий Устюг с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС). Обучение ИНС проводилось с использованием программы Statistica 7. Модуль «Neural networks» данной программы является одним из самых современных инструментов для обучения искусственных нейронных сетей, включающий в себя большое количество как простых, так и сложных архитектур и большое количество вариантов активизирующих и весовых функций.

В основе ИНС лежит попытка моделирования процессов протекающих в человеческом мозге. Математически нейрон представляет собой взвешенный сумматор, который обрабатывает совокупность поступивших в него сигналов с помощью различных весовых функций, либо коэффициентов в зависимости от типа ИНС. Каждая нейронная сеть имеет в своем составе входные нейроны, в которые помещается исходная информация. Нейроны скрытого слоя, в которых идет преобразование данных, а также нейроны выходного слоя, в которые поступает результат вычислений. Совокупность нейронов и путей связи между ними представляет собой архитектуру нейронной сети [Васильев, 2009].

Искусственные нейронные сети успешно опробованы для прогнозирования стока, сроков наступления различных гидрологических явлений, расчетов загрязнений и воднобалансовых расчетов. Применение ИНС для прогнозирования максимальных заторных уровней может быть оправдано значительным числом факторов, влияющих на образование затора и заторного подъема воды [Dagrell, Massie, 2002]. Отличительной чертой ИНС является возможность ее обучения, то есть обновления связей между различными предикторами с целью оптимизации прогноза и запоминание сетью всех шагов обучения. Обученная модель способна «распознавать» данные, необходимые для прогнозирования в массивах информации, и применять их для формирования прогноза.

Было использовано две архитектуры ИНС (рис. 3 и 4) – архитектура радиальных базисных функций (РБФ) и архитектура трехслойного перцептрона (MLP). В обеих архитектурах используются три слоя нейронов, разница заключается в принципах преобразования данных. В случае MLP-архитектуры, каждому нейрону скрытого слоя назначается определенный вес, преобразующий исходные данные, и активационная функция, участвующая в передаче данных в выходной слой. Оптимизация прогноза проходила по методу антиградиента. В этом случае, сигнал последовательно возвращается от выходных нейронов к скрытому слою, а затем к входному слою, а затем возвращается к выходному, и так до тех пор, пока в многомерном анализируемом пространстве не будет достигнут минимум. При использовании РБФ-архитектуры в скрытом слое каждый нейрон преобразует поступающие в него сигналы с помощью определенной функции преобразования (в данном случае автоматически назначалась гиперболическая функция). Преимущество данной архитектуры – ее сравнительно более быстрая обучаемость.

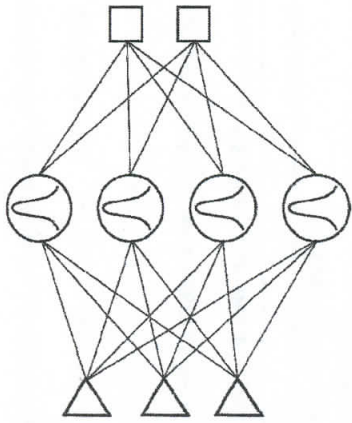


Рисунок 3 – Архитектура РБФ

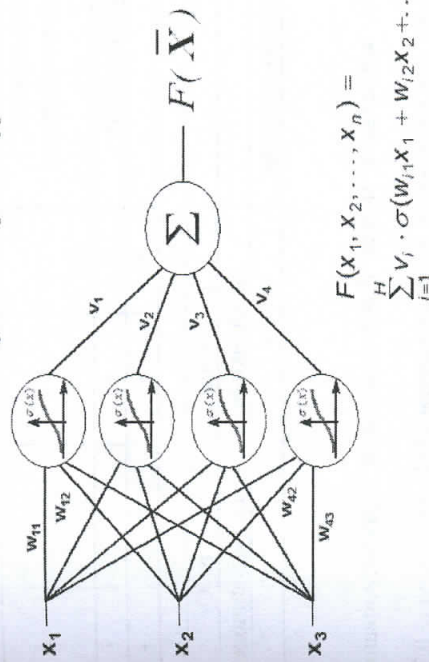


Рис. 4. Модель многослойного (трехслойного) перцептрона

В качестве предикторов были использованы данные по постам рр. Сухона и Юг, характеризующие условия от образования ледостава до подготовки к вскрытию (табл.1). Включение в прогноз данных по нескольким постам р. Сухона позволяет учесть распределение характеристик, сложившихся к началу вскрытия условий, возможное распределение заторов по длине реки и вероятность формирования затора льда ниже г. Великий Устюг. Метод ИНС является относительно новым в гидрологии и остается вопрос об оценке качества методики прогноза. Для анализа результатов прогнозов использовался метод выбрасываемой точки. После обучения на полном ряду данных, производилась

проверка результатов на произвольно выбранном году. Проверка была осуществлена для каждого года.

Таблица 1 – Предикторы для прогноза максимального заторного уровня воды

р. Сухона у г. Великий Устюг

река пост	р. Сухона				
	Тотьма	Березовая Слободка	Каликино	Великий Устюг	
Ледоставный уровень воды	+	+	+	+	+
Продолжительность периода замерзания и осеннего ледохода (шугохода)	-	-	-	-	+
Толщина льда, максимальная	+	+	+	+	+
Дата вскрытия	+	+	+	+	+
река пост	р. Сухона				р. Юг
Расход воды за день до вскрытия	гп Каликино				гп Подосиновец
	+				+

В результате, корреляция между фактическими и спрогнозированными уровнями была равна при обучении с использованием MLP-архитектуры 0,7-0,9. При использовании РФФ-архитектуры, получены значения коэффициента корреляции для тех же данных от 0,4 до 0,8. Причем при последовательном обучении большого числа сетей (до 10) на каждом наборе исходных данных, наилучшие результаты получены для последних обученных сетей.

Модуль «Neural networks» в качестве оценки качества получаемой зависимости предлагает отношение стандартного отклонения ошибки прогноза к стандартному отклонению исходных данных. Это отношение аналогично используемой в практике гидрологических прогнозов характеристике  $s/\delta$ , где  $s$  – среднеквадратическое отклонение эмпирических точек от установленной зависимости, а  $\delta$  – среднеквадратическое отклонение предсказываемой величины.

В современных условиях меняющегося климата вопросы прогнозирования максимальных заторных уровней воды и организации противозаторных мероприятий остаются актуальными. Для отдельных участков рр. Северная Двина и Сухона заторы в период весеннего ледохода образуются ежегодно, но не всегда ведут к наводнениям. Применение новых методов, в том числе ИНС для прогноза максимальных заторных уровней воды дает хорошие результаты.