

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕРРИТОРИЙ И СООРУЖЕНИЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ СТОЛИЧНЫХ ПРУДОВ

В.И. Волков, кандидат технических наук, профессор,

О.Н. Черных, кандидат технических наук, профессор

*ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ-МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»,*

В.И. Алтунин, кандидат технических наук, доцент

*ФГБОУ ВО «МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (МАДИ)
г. Москва, Россия*

Рассматриваются различные подходы к оценке безопасности нижнего бьефа низконапорных городских гидроузлов и параметров волны прорыва при аварии гидротехнических сооружений в условиях сложившейся городской инфраструктуры и на территориях, присоединяемых к городским.

Various approaches to an assessment of safety of the lower byef of low pressure city water-engineering systems and parameters of a wave of break at failure of hydraulic engineering constructions in the conditions of the developed city infrastructure and in the territories attached to the city are considered.

Ключевые слова: безопасность, грунтовая плотина, водосброс, волна прорыва, зона затопления, сценарии аварий, каскад прудов, усадебный гидроузел, ущерб при аварии.

Keywords: safety, a soil dam, a spillway, a break wave, a flooding zone, scenarios of accidents, the cascade of ponds, the farmstead water-engineering system, damage at accident.

В рамках интенсивной урбанизации московской территории одним из актуальных вопросов городской гидротехники является обеспечение безопасности с одновременным решением проблем сохранения, природоприближённого восстановления, реставрации и реконструкции столичных природных территорий и их гидротехнических систем. Большое внимание при оценке безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) для урбанизированных территорий следует обращать на реконструкцию старых плотин, особенно усадебных гидроузлов, исторически оказавшихся в густо населённых районах столицы.

Из общего количества московских прудов (в 2011 г. их было примерно

650) около 16% раньше были пригородными усадебными [1]. Сейчас «старые» пруды имеют статус памятников культуры и парковых ландшафтов Москвы. Чаще всего они располагаются на ООПТ. Некоторые из них были реконструированы в середине прошлого столетия, во время индустриального подъёма жилищного и капитального строительства, проводившегося в 1960-1980 гг. в Москве. Однако в результате такого благоустройства, когда работы велись без каких-либо экологических обоснований и ограничений, многие столичные пруды полностью утратили характеристики природного водоёма и необходимые элементы для функционирования водной экосистемы (Советский пруд в Перово, пруды в Кусково, Останкино, Люблино, Петровско-Разумовское, Головинские пруды в Михалково и многие другие) [2]. Поэтому сегодня большая часть «старых» прудов мегаполиса (51%) подлежат реставрации и капитальному ремонту [3]. В связи с расширением границ Москвы число водоемов существенно увеличилось. Относительно недавно в городскую черту попал ещё ряд прудов: в усадьбах Чернево, Бутово, Захарьино; в новых районах Куркино, Щербинке, Митино, Рождествено, Переделкино, Солнцево и другие пруды в Новой Москве (порядка 170). Испытываемые страной экономические проблемы привели к тому, что реализация, как среднесрочной, так и долгосрочной (до 2020г.) программ восстановления водных объектов в Москве практически приостановлены. В 2014 г. велись работы практически по восстановлению лишь одного пруда в Останкино. Для сохранения экологического каркаса города, развития туризма и рекреационных зон Департаментом жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства Москвы и Департаментом природопользования и охраны окружающей среды сделан упор на обновление и восстановление наиболее крупных рек Москвы и области: Яузы, Сетуни, Лихоборки и Москва-реки.

Как показывают натурные обследования, проводимые на кафедре гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА, сегодня водная система некоторых столичных парковых объектов полностью разрушена и представляет собой отдельные самостоятельные элементы («Братцево»,

«Студенец», «Алтуфьево», ряд старинных пригородных усадеб в Щербинке, Балашихе, Королёве, Мытищах и других, граничащих с Москвой территориях Московской области). Практически руинировано порядка 9 % московских прудов. Анализ технического состояния водоёмов Москвы в административных округах показал, что для разных АО процент объектов, требующих капитального ремонта, среди обследованных прудовых гидроузлов составляет от 15 до 52 %. В удовлетворительном состоянии находятся от 3 до 23% водоёмов. Состояние лишь 3...16% прудов можно квалифицировать как хорошее [1 - 3].

В условиях мегаполиса со сформировавшейся гидросетью можно вычленил два типа современных городских прудов: плотинные (напорные) (менее 40 %) и наливные (безнапорные) (около 56 %). В настоящее время в Москве имеются 4 водоёма объёмом более 0,5 млн м³, объёмом 0,5...0,1 млн м³ - порядка 45, остальные имеют объём менее 0,1 млн м³. Большинство ГТС эксплуатируются более 40...50 лет. Необходимость их реконструкции определяется, в первую очередь, такими обстоятельствами как: старение конструкции; повреждение отдельных элементов ГТС; несоответствие принятых при строительстве решений современным требованиям безопасности; изменение либо уточнение гидрологических данных в период эксплуатации гидроузла; изменение по ряду обстоятельств класса ГТС.

Для гидроузлов Москвы наблюдается негативная тенденция увеличения числа сооружений с опасным и неудовлетворительным уровнем безопасности (в соответствии с терминологией, используемой в Российском Регистре ГТС). Именно для таких гидроузлов наиболее опасными сценариями развития гидродинамических аварий будут деформация и разрушение напорного фронта сооружений. По результатам обследований столичных водоёмов установлено, что 176 из них образованы грунтовыми плотинами и дамбами (состояние на 2012 г.). Высоту 5...10 м имеют 24 плотины (16 %), более 10 м - 2 плотины (1 %), 3...5 м - 64 плотины (36 %), менее 3 м - 63 плотины (35 %). Несомненно, наибольшую опасность для окружающей территории с точки зрения

возможности развития гидродинамической аварии имеют пруды с развитым напорным фронтом, который формируется в основном однородными земляными плотинами (99%). Использование для этой цели плотин из бетона и камня в мегаполисе ограничено (Борисовская плотина).

Безопасность низконапорных гидроузлов также во многом определяется наличием и состоянием водопропускных и, в частности, водосбросных сооружений. На прудах Москвы функционируют 164 водосбросных сооружений, из которых преобладают трубчатые водосбросы (94 %). Среди них наиболее распространены нерегулируемые (башенные, шахтно-башенные, безбашенные и др.). Приплотинные водосбросы часто совмещены с водовыпускными сооружениями, но достаточно полных данных по ним нет. Паводковые водосбросы и водовыпуски в подавляющем большинстве находятся в предаварийном или аварийном состоянии [1, 3].

В мегаполисе - более 80 каскадов с запруженными прудами, которые влияют на работу друг друга. Так на р. Городне было обследовано 3 каскада, состоящих из 21 пруда, на р. Очаковке - 2 каскада из 11 прудов, на р. Битце с притоком р. Журавенки – 2 каскада из 10 прудов и т.д. Напоры на подпорных сооружениях каскадных гидроузлов составляют в основном 2...6 м, а расстояния между ними не превышают нескольких десятков километров (пруды усадеб Петровско-Разумовское, Битца-Садки, Кусково, Кузьминки-Влахернское, Люблино и пр.). Иногда пруды каскада непосредственно отделяются друг от друга перегораживающими дамбами или плотинами (пруды в столичных усадьбах Узкое, Чернево, Михалково, Покровское-Стрешнево и др.). Поэтому наиболее неблагоприятными аварийными ситуациями на таких гидроузлах являются возможные повреждения или разрушение плотины вышележащего пруда. В целом состояние водоподпорных сооружений водоемов Москвы в основном удовлетворительное. Однако примерно 12 % из общего числа обследованных плотин находится в потенциально опасном или аварийном состоянии вследствие недопустимо малого запаса гребня плотины над уровнем верхнего бьефа (например, пруд № 2 в Толстопальцево ЗАО,

плотина между прудами № 5 и № 6 в парке усадьбы Покровское-Стрешнево СЗАО) или высачивания фильтрационных вод на низовом откосе (в зоне отдыха на Битцевской плотине, плотинах между прудами в Чернево, в одной из самых высоких плотин Москвы на Барышихинском пруду, плотинах каскада Царицынских прудов и др.).

В истории гидротехнического строительства имеются реальные примеры аварий, связанных с несоответствием пропускной способности водосбросов стоку экстремального паводка, а так же с состоянием водосбросов или с неправильными действиями эксплуатационного персонала. Реконструкция водосбросов старых плотин в настоящее время входит в практику мировой гидротехники, что требует разработки общих конструктивных подходов и конкретных предложений, например, к перепроектированию входного оголовка или устройств нижнего бьефа, в частности, водобойных колодцев и т.п. По разным причинам на данный момент это обстоятельство в проектах реконструкции и восстановления городских гидроузлов в мегаполисе учитывается не достаточно. Зачастую при реконструкции используется упрощённая и неэффективная конструкция водосбросного сооружения либо проводятся лишь косметические мероприятия (подсыпка гравия или песка, добетонировка, замена берегоукрепления и пр.). Если водосброс не реконструировать, то актуальными становятся меры по усилению элементов конструкции плотин, модернизации дренажной системы, и обязательное расширение системы мониторинга.

Для прудов Москвы при рассмотрении схем возможных сценариев развития аварий при чрезвычайной ситуации на «старых» гидроузлах из двух групп факторов (природного и антропогенного характера - аварии на вышерасположенных гидроузлах, террористические акты, ошибки проектирования при реконструкции и восстановлении водного объекта, строительства, эксплуатации ГТС, неправильные действия или бездействие персонала в нештатных ситуациях, нарушения, вызванные очень длительным сроком эксплуатации сооружений и т.д.), которые обычно обуславливают

аварии ГТС, с учётом типа, конструкции и состояние ГТС плотины и их отдельных элементов, можно вычлениить следующие возможные источники опасности:

- нарушение устойчивости откосов грунтовой плотины;
- нарушение фильтрационной прочности тела и/или основания грунтовой плотины;
- нарушение фильтрационной прочности грунтов тела плотины на контакте с отводящими трубами закрытого водосброса;
- недостаточная пропускная способность водопропускных отверстий ГТС.

Начальной фазой возможной гидродинамической аварии на гидроузлах, как правило, является прорыв подпорного сооружения (плотины или дамбы) [4]. При прорыве напорного фронта гидроузла в проран поступает водный поток, имеющий значительную скорость движения. Этот неуправляемый поток воды из водоёма через проран устремляется в нижний бьеф гидроузла. В его фронте образуется волна прорыва, обладающая огромной разрушительной силой.

Для каждого водохранилища, на котором по данным прогноза авария может привести к подъему воды на высоту более 1м, должны разрабатываться атласы или карты возможного (вероятного) чрезвычайно опасного затопления и определяться характеристики волны прорыва, поскольку на этой территории возможны наиболее тяжелые последствия для населения и сильные разрушения [5].

Расчёты образования прорана при прорыве подпорного ГТС, оценку параметров и распространение волны прорыва на территории нижнего бьефа можно выполнить по пакетам отечественных или зарубежных программных комплексов, использующих одномерные и двухмерные схемы гидравлических и гидрологических расчётов пропуска паводков, потоков течений и последствий их воздействий в нижнем бьефе: MIKE 11 и MIKE 21, разработанных DHI Water and Environmental (Дания, 2003); «SV_1», разработанным С.Я. Школьниковым; «Бор» и «River», разработанных В.В. Беликовым. Наиболее достоверные параметры волны можно получить,

построив физическую модель водохранилища и рельефа ниже по течению водотока.

Существует так же ряд упрощенных методов, разработанных для предварительной приближенной оценки параметров волны прорыва, а в некоторых менее ответственных случаях и для окончательного прогноза ее параметров. В этой связи составной частью выделенной проблемы - обеспечения безопасности при техногенных катастрофах на урбанизированных территориях и сохранению историко-культурного наследия России, является решение задачи корректного определения параметров волны прорыва достаточно простыми инженерными методами, позволяющими оперативно оценивать степень опасности низконапорного гидроузла для нижнего бьефа.

Анализ результатов расчётов параметров волны прорыва при возможной аварии Истринского гидроузла, выполненный И.А. Секисовой показал, что модели, построенные с использованием одномерных уравнений Сен-Венана (программа «River» и программа MIKE 11) незначительно уступают по точности программе «Бор», базирующейся на решении двумерных уравнений Сен-Венана [5, 6]. Ошибка колеблется в пределах от 0,7 до 22,3 % при определении значений максимальной глубины затопления; от 0,7 до 19,1 % при определении значения максимального расхода; от 0,1 до 14,3% при определении времени добегания до расчётных створов; от 7,5 до 19,1% при определении значения времени, за которое отметка затопления в расчётных створах достигает своего максимального значения. И.А. Секисовой с учётом границ применимости этих методик, был сделан вывод о достаточной степени достоверности и значительной простоте расчёта по методике Б.Л. Историка для оценки состояния низконапорных гидроузлов Московской области [5, 6]. Весьма близкие результаты получаются при определении значения максимальной глубины затопления: ошибка по сравнению с двухмерной математической моделью колеблется в пределах от 0,3 до 14,6%; при определении значения времени добегания до расчётных створов – от 2,9 до 15,7 %. Причём наибольшие расхождения в результатах наблюдаются в створах,

расположенных вблизи к створу плотины. Графоаналитический метод Б.Л. Историка хотя и прост в использовании и недорог, но работа с безразмерными графиками и определение осреднённого поперечного сечения рассматриваемого створа является сравнительно сложным и трудоёмким процессом. Метод ориентирован, в основном, на случай отсутствия подпора в нижнем бьефе от нижерасположенной плотины.

Для апробации разработанных на кафедре ГТС основных принципов проведения детального анализа оценки безопасности ГТС гидроузла с грунтовой плотиной в 2013-2015 гг. при оценке состоянии 20 прудовых гидроузлов мегаполиса было выполнено сравнение различных методов расчёта волны прорыва, позволяющих с приемлемой точностью осуществлять предварительную экспертную оценку масштабов чрезвычайной ситуации в случае прорыва напорного фронта плотин столичных гидроузлов. Для этого проанализировав существующие методики, из них были выбраны 3 упрощённых: методика МЧС РФ, методика И.А. Сакисовой и Г.М. Каганова, компиляционная зависимость В.И. Волкова.

Модификации программы «Волна», используемой МЧС предназначены в основном для прогнозирования масштабов затопления местности и характеристик волны прорыва при разрушении средне и высоконапорных гидроузлов. Однако они так же позволяют оценить последствия разрушения гидроузлов при использовании в работах по исследованию аварий и катастроф на ГТС и более низкого класса. В упрощённой методике МЧС РФ (методика ВНИИ ГОЧС) с программным комплексом «Волна» основными параметрами поражающего действия волны прорыва приняты максимальные: глубина затопления, ширина затопления и скорость течения, время прихода фронта, гребня и хвоста волны прорыва. Кроме того, в результате вычислений приводятся данные о максимальном расходе воды в створе, высоте волны (превышение уровня воды над уровнем бытового потока) и максимальная отметка затопления. Площадь территорий и объекты, попадающие в зону затопления, устанавливаются путём нанесения на имеющуюся

топографическую карту границ максимального возможного затопления, определённых в расчётных створах [7].

Глубина затопления в зависимости от основных параметров гидроузла и условий распространения волны прорыва в нижнем бьефе может быть определена по эмпирической формуле И.А. Секисовой, выведенной для получения предварительных оценок масштабов вероятного вреда в случае аварии низконапорных гидроузлов [5]

$$h_{\max} = 2,5 W_{\text{вод}}^{-0,05} H_0^{0,98} n_0^{0,02} Q_0^{0,05} x^{-0,13}, \quad (1)$$

где h_{\max} - максимальная глубина волны прорыва, м;

$W_{\text{вод}}$ – объем водохранилища ВБ до начала аварии, м³;

H_0 – глубина водохранилища у плотины до начала аварии, м;

n_0 – шероховатость русла верхнего бьефа;

x – расстояние от створа плотины до створа наблюдений, м;

Q_0 – расход воды в нижнем бьефе гидроузла до начала аварии, м³/с.

Начальные параметры для расчета максимальной глубины затопления устанавливаются в зависимости от принятого сценария аварии. Средняя относительная ошибка аппроксимации уравнения (1) по сравнению с проведением полноценного расчета по методике Б.Л. Историка составляет 12,8 %.

Формула (1) имеет ограничения и применима в следующем диапазоне изменения параметров: объем водохранилища $W_{\text{вод}}$ от 50 до 5000 тыс. м³; глубина воды в верхнем бьефе у плотины H_0 от 2 до 20 м; расход воды в нижнем бьефе гидроузла до начала аварии Q_0 от 1 до 100 м³/с; длина водохранилища от 0,8 до 2 км при условии отсутствия подпора со стороны нижерасположенных ГТС; расстояние от створа плотины до рассматриваемого сечения x от 0,5 до 50 км; шероховатость n_0 от 0,02 до 0,2. При этом отводящее русло принимается призматической формы с треугольным поперечным сечением и постоянным продольным уклоном дна.

При отсутствии данных, необходимых для использования формулы (1), определение максимальных глубин затопления в расчетных створах нижнего

бьефа каскада гидроузлов может быть осуществлено по зависимости (2), предложенной В.И. Волковым, или по графику (рис. 1), построенному на основании этой зависимости

$$h_{\max} = 0,34H_0 \left(\frac{x}{H_0}\right)^{-0,13} \quad (2)$$

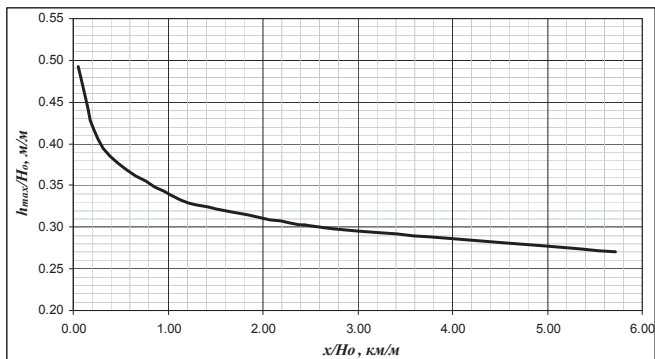


Рис. 1. График для определения максимальных глубин волны прорыва по зависимости (2)

Рассмотрим на примере частично реконструированного каскада прудов в усадьбе Чернево (табл. 1) определение параметров волны прорыва наиболее простыми инженерными методами, позволяющими оперативно оценивать степень опасности низконапорного гидроузла для нижнего бьефа.

Таблица 1

Основные габариты каскада прудов в усадьбе «Чернево»

№ пруда	L , м	B_{\max} м	F , га	$h_{ср}$ м
1	360	75	1,6	2,0
2	350	65	2,0	2,0
3	800	150	15	2,0

Где: L – длина пруда; B_{\max} – максимальная ширина пруда; F – площадь зеркала пруда; h – средняя глубина

Каскад прудов территориально находится на окраине города Москвы в ЮЗАО, к югу от МКАД – в районе Южное Бутово (рис.2). В 2011 г.-2014 гг. были проведены работы по очистке пруда и обустройству прилегающей парковой территории, практически не затрагивающие основные

гидротехнические сооружения гидроузла: грунтовую плотину и закрытый водосброс (рис. 3).

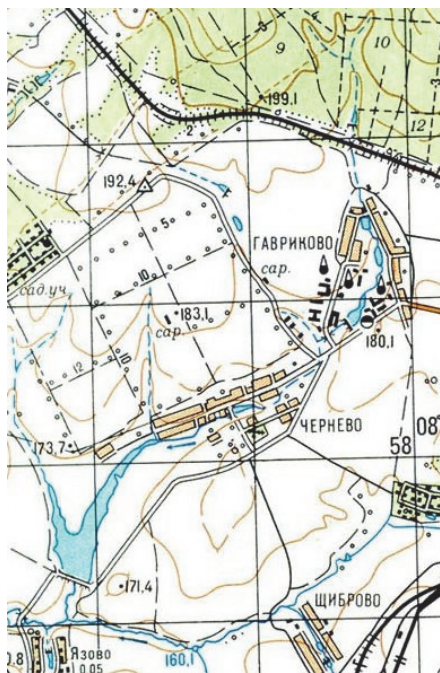


Рис 2. План территории с каскадом прудов в усадьбе Чернево (топография Южного Бутово до начала массовой застройки, 1985 г., ЮЗАО, 1:50000). Границы зоны затопления в нижнем бьефе при прорыве плотины №3 показаны красным цветом



Рис. 3. Некоторые элементы пруда №3 каскада в усадьбе Чернево, 2012 г.: а – нижний бьеф после реконструкции; б - остатки разрушенной плотины в верхней части пруда

Расчёты по рассмотренным методикам показали (табл. 2), что расхождения между значениями h_{\max} , подсчитанным по зависимостям (1) и (2), незначительны (менее 4...8%), а по программе МЧС составляют более 20%. Максимальная глубина затопления нижнего бьефа в районе створа плотины может составить порядка 3,5...4 м, а на расстоянии 250 м, где ранее проходила граница с Московской областью и начинаются участки частных строений и городские новостройки, её величина может быть около 2,3 м. Это грозит затоплением и значительным материальным ущербом частным домам микрорайона Язово, ЖК Новое Бутово и расположенному ниже по течению р. Цыганки садовым участкам и коттеджному посёлку Потапово.

Таблица 2

Результаты расчёта высоты волны прорыва (h_{\max}), м для нижнего бьефа пруда №3 каскада в усадьбе Чернево

X, м	По методике ВНИИ ГОЧС программа «Волна»	По формуле (1) И.А. Секисовой	По зависимости (2) В.И. Волкова
50	4,33	3,24	3,18
100	3,37	2,96	2,90
200	2,91	2,71	2,65
300	2,5	2,04	2,05

Следует отметить, что для городских низконапорных гидроузлов на урбанизированной и густо застроенной территории, с забранными в коллектора отводящими руслами водотоков, а иногда засыпанными и спланированными нижними бьефами, такие расчёты то же следует считать приближёнными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов расчётов глубины затопления в разных створах нижнего бьефа низконапорных плотин каскадных гидроузлов Москвы, выполненных по различным методикам показал, что упрощённые методы, разработанные на кафедре гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА применительно к низконапорным плотинам в агроландшафтах, удовлетворительно согласуются с результатами расчета по методикам,

базирующимся на численных методах решения уравнения Сен-Венана, заложенных в программы «БОР», MIKE 11 и MIKE 21. Результаты расчета по методике ВНИИ ГОЧС заметно отличаются от рассмотренных методов. Для использования этой методики требуется её доработка, в особенности для урбанизированных территорий с интенсивной застройкой.

Основным параметром волны прорыва для низконапорных гидроузлов при расчёте ущербов от наводнений и определения зоны затопления обычно является максимальная глубина затопления нижнего бьефа. Поэтому представляется целесообразным для определения этого параметра при оперативном выполнении экспертных оценок в случае прорыва напорного фронта низконапорных гидроузлов при отсутствии в нижнем бьефе объектов возможных разрушений (промышленного и жилого фонда), сельскохозяйственных угодий, объектов, сбрасывающих опасные вещества в окружающую среду и пр. видов хозяйственных элементов, могущих привести к реальному ущербу, и отсутствие при этом подпора со стороны нижнего бьефа, применять зависимость В.И. Волкова, являющейся упрощённой аппроксимацией методики И.А. Секисовой и Г.М. Каганова.

Для низконапорных ГТС, имеющих свою специфику на урбанизированных территориях, эта методика должна быть оценена для всех расчётных случаев. Целесообразно для реальных высокозначимых водных объектов столицы провести расчёты и по другим методикам, базирующимся на численных методах решения уравнения Сен-Венана. Требуется более детальная оценка ошибок расчета по этой методике при наименьшем числе допущений, при этом в дальнейшем желательно сопоставить полученные результаты с данными экспериментальных исследований и натурных наблюдений.

В качестве необходимого элемента программы обеспечения безопасности ГТС Москвы нужна разработка полновесной системы постоянного мониторинга всех городских ГТС, не зависимо от формы их собственности. Считаем, что расчет по определению параметров возможной волны прорыва, зоны затопления и ущербов для ряда основных каскадных гидроузлов

мегаполиса, находящихся на вновь присоединённых или трансграничных с областью территориях, является обязательным и целесообразным, так как в зону катастрофического затопления могут попасть: жилой фонд, промышленные зоны, складские помещения, автодороги, ценные земельные угодья, лесные массивы, ООПТ и другие объекты, затопление которых может причинить ущерб третьим лицам. В отдельных случаях для столичного региона величина общего ущерба с учётом экологической составляющей и специфики развития мегаполиса может быть довольно значительной.