

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОРАНА ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ АВАРИЯХ НА НАМЫВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© 2011 г. Н.Б. Шакирова, М.Г. Морозов, А.В. Комин

*ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург*

Ключевые слова: безопасность гидротехнических сооружений, Mike 11, намывные гидротехнические сооружения, гидродинамическая авария, проран, процесс образования прорана.

В статье показан механизм образования прорана в результате гидродинамической аварии на намывных гидротехнических сооружениях промышленных предприятий, основываясь на расчетах, выполненных авторами при разработке «Расчетов вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС» по двум объектам: хвостохранилище Качканарского ГОКа и шламохранилище № 2 Богословского Алюминиевого завода филиала «БАЗ-СУАЛ». Сопоставляя расчеты образования прорана по этим объектам было установлено, что формирование прорана протекает в 3 стадии, в связи с чем расчет развития прорана производится по определенному алгоритму. А также были выявлены четыре позиции, влияющие на формирование прорана на намывных гидротехнических сооружениях промышленных предприятий, которые необходимо подтвердить в дальнейшем изучении механизма развития гидродинамической аварии с образованием прорана на ГТС намывного типа.

При выполнении комплексов работ по оценке безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) промышленности (хвостохранилища, шламонакопители, золоотвалы) как на стадии предпроектных проработок и проектирования, так и на стадии разработки исполнительной документации (декларация безопасности, расчет вероятного вреда, критерии безопасности и т. д.) возникает необходимость определения наиболее вероятных и наиболее опасных сценариев возникновения гидродинамической

аварии на сооружениях [1] и, как следствие, параметров волны прорыва и границ зоны возможного затопления.

На сегодняшний день используется множество программных продуктов, с помощью которых можно наиболее точно и быстро определять параметры волны прорыва и границу зоны возможного затопления, например, разработанная С.А. Школьниковым программа «SV-1», «БОР» и «River» В.В. Беликова, а также зарубежная – «Mike 11» Датского гидравлического института [2].

Однако использование указанных программных продуктов применительно к намывным гидротехническим сооружениям промышленности имеет ряд существенных ограничений, поскольку механизм образования прорана и дальнейшее развитие гидродинамической аварии на них существенно отличаются от данных параметров на грунтовых плотинах или дамбах наливных накопителей. Указанные отличия возникновения и протекания гидродинамической аварии заключаются в следующем:

1. На наливных накопителях (грунтовых плотинах водохранилищ) при аварии с разрушением сооружений напорного фронта в нижний бьеф изливается только жидкая фаза (вода), в то время как на намывных сооружениях происходит истечение взвеси (пульпы), то есть наблюдается селевой поток.

2. При расчетах в программных комплексах и использовании существующих методик на начальной стадии расчета задается размер прорана (сразу на всю высоту сооружения или определенное соотношение длины и ширины), в то время как на намывных сооружениях предполагается постепенное по времени развитие прорана и изменение параметров волны прорыва.

В связи с вышеуказанным, для того чтобы оценить достоверность результатов расчетов, полученных с помощью программного продукта, необходимо детально изучить весь цикл гидродинамической аварии, начальной фазой которой является процесс образования прорана и истечения через него неуправляемого потока жидких отходов в нижний бьеф накопителя.

К намывным гидротехническим сооружениям относятся ограждающие дамбы, которые [3] сооружаются намывом из переработанных отходов (хвостов или шламов) после строительства пионерных дамб, возводимых из местных грунтов, в основном из вскрышных пород. Пионерная дамба замывается отходами 1-го яруса намыва таким образом, чтобы крупные частицы отходов откладывались ближе к упорной призме, а мелкие частицы далее к пруду-отстойнику. Нарращивание хранилища ограждающими намывными дамбами производится после окончания намыва нижнего яруса и

образования соответствующего пляжа – зоны между ограждающими намывными дамбами и прудком-отстойником (рис. 1).

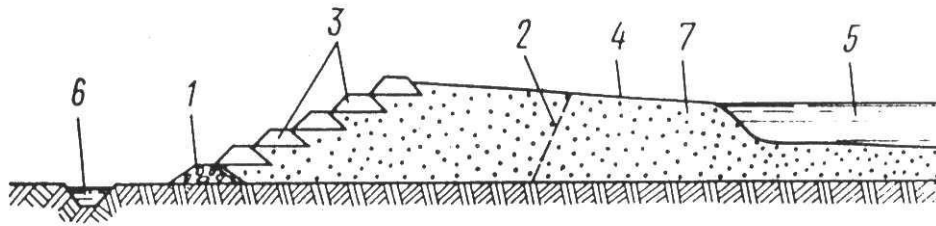


Рис. 1. Схема возведения намывных сооружений: 1 – пионерная дамба (первичная дамба обвалования) из вскрышных пород с обратным фильтром; 2 – граница упорной призмы; 3 – намывные дамбы (вторичные дамбы обвалования); 4 – пляж; 5 – прудок-отстойник; 6 – канава; 7 – заскладированные отходы.

Механизм образования прорана в результате гидродинамической аварии на намывных ГТС промышленных предприятий показан на основании расчетов, выполненных авторами при разработке «Расчетов вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС» по двум объектам: хвостохранилище Качканарского ГОКа [4] и шламохранилище № 2 Богословского Аллюминиевого завода филиала «БАЗ-СУАЛ» [5].

Известно, что при намыве ограждающих дамб накопителей жидких промышленных отходов применяются два вида намыва пульпы: рассредоточенный (через отдельные выпуски) и сосредоточенный (через торец трубы). При этом на хвостохранилище Качканарского ГОКа ограждающие дамбы намывают торцевым способом намыва хвостов, а на шламохранилище № 2 Богословского Аллюминиевого завода («БАЗ-СУАЛ») – рассредоточенным намывом шламов.

Согласно указанным документам [4, 5], на хвостохранилище Качканарского ГОКа (рис. 2) сценарием наиболее тяжелой и наиболее вероятной аварии является [4] возникновение суффозионных процессов на участках интенсивного наращивания дамб. При этом образование прорана возможно лишь за счет суффозионного разрушения низового откоса дамбы обвалования, если угол его наклона будет превышать критический ($\varphi/2$), что, как правило, имеет место при торцевом намыве отходов.



Рис. 2. ГТС хвостохранилища Качканарского ГОКа.

Что касается шламоохранилища № 2 «БАЗ-СУАЛ» (рис. 3), то по результатам расчетов коэффициентов надежности и рисков разрушения ограждающей дамбы [5], было выявлено, что наиболее вероятным сценарием возникновения гидродинамической аварии, является оползень низового откоса ограждающей дамбы, а наиболее опасным сценарием – размыв ограждающей дамбы водным потоком, переливающимся через ее гребень.



Рис. 3. ГТС шламохранилища № 2 Богословского алюминиевого завода.

На основании сопоставления расчетов образования прорана по вышеуказанным двум объектам, приведенных в документах «Расчетов вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС», установлено, что формирование прорана (рис. 4) протекает в 3 стадии:

1. Начальная стадия. Образование прорана происходит в результате создания аварийных ситуаций на намывных ГТС промышленных предприятий. Например, на хвостохранилище Качканарского ГОКа [4] возникновение аварийных ситуаций связано с возможностью размыва гребней дамб при разрыве разводящего пульпопровода или сверхрасчетного подъема уровня воды в приоткосной зоне, где ведется наращивание высоты дамб торцевым намывом. А на шламохранилище № 2 «БАЗ-СУАЛ» возникновение аварийных ситуаций связано с грубым нарушением Правил безопасности ГТС накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02) [6], в частности несоблюдением пунктов 8.15 и 8.17, когда на участке производимого намыва не соблюдается технология намыва (практически отсутствует пляж и имеет место обратный уклон, превышение гребня ограждающего валика на участке намыва над пляжем составляет 0,2 м и менее) [5].

2. Размыв гребня дамбы и пляжа (горизонтальный участок прорана) на уровне уреза воды [4], сопровождающийся медленным углублением дна прорана из-за

небольшой глубины воды в проране, относительно низкой скорости стока и значительной протяженностью прорана, предопределяющей большой объем подлежащих размыву и транспортировке хвостов.

3. После размыва низового откоса дамбы происходит быстрое понижение дна прорана, вследствие чего имеет место лавинообразное увеличение расхода воды через него [4].

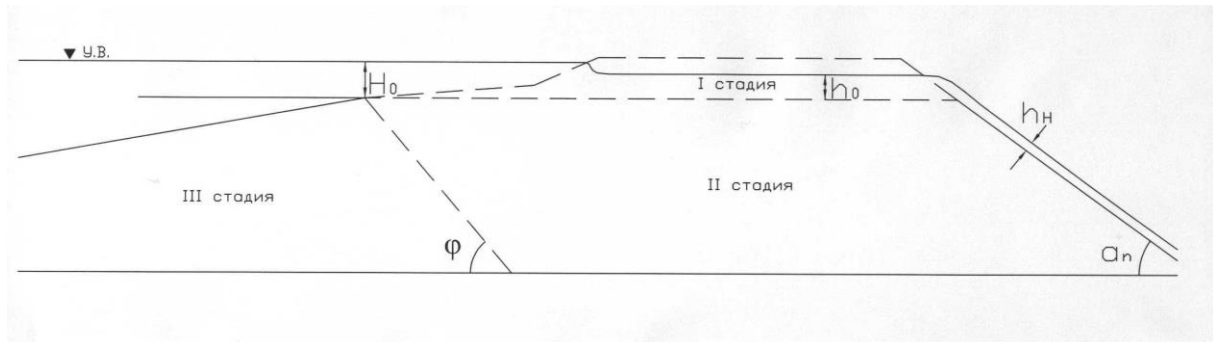


Рис. 4. Схема формирования прорана в намывной дамбе накопителей: H_0 – напор на подходе к прорану; h_0 – глубина воды в проране; h_n – толщина слоя стока в проране на низовом откосе дамбы; φ – угол внутреннего трения; α_n – угол наклона низового откоса.

Расчет развития прорана

Расчет развития прорана производится по следующему алгоритму:

1. В связи с тем, что дамбы обвалования формируются [4] с помощью бульдозера без уплотнения крупных фракций хвостов (шламов), они практически не препятствуют движению воды через них. При оценке динамики стока воды с участка намыва в сторону низового откоса можно использовать уравнение расхода через водослив с широким порогом, рассчитываемый по формуле, взятой из справочника по гидравлическим расчетам под редакцией П.Г. Киселева [7]:

$$Q_0 = mb_0 \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где Q_0 – расход пульпы через проран, м³/с;

m – коэффициент водослива [7];

b_0 – начальная ширина прорана, определяется в зависимости от вида сценария аварии на ГТС; в дальнейшем ширина прорана определяется для каждого i -го слоя по формуле [4, 5], м:

$$b_i = b_{i-1} + 2\Delta H_i \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2}, \quad (2)$$

где ΔH_i – величина углубки прорана;

φ – угол внутреннего трения грунтов, слагающих борта прорана.

Из уравнения (1) вычисляется H_0 (м) – напор на подходе к прорану по формуле:

$$H_0 = \left(\frac{Q_0}{mb_0 \sqrt{2g}} \right)^{2/3}. \quad (3)$$

Глубина воды в проране h_0 (м), в свою очередь, рассчитывается по формуле [8]:

$$h_0 = \frac{2}{3} H_0. \quad (4)$$

2. Средняя скорость v_0 (м/с) течения воды по прорану рассчитывается по формуле [8]:

$$v_0 = \frac{Q_0}{b_0 h_0}, \quad (5)$$

Для определения будет ли иметь место дальнейшая углубка прорана и его развитие в сторону отстойного пруда, по формуле В.Н. Гончарова [9], рассчитывается неразмывающая скорость турбулентного потока v_n (м/с):

$$v_n = \operatorname{lg} \frac{8,8H_0}{d_{95}} \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho_o)}{3,5\rho_o}} d_{50}, \quad (6)$$

где ρ_s и ρ_o – плотность минеральной части хвостов (шламов) и воды, соответственно, кг/м³;

d_{50} и d_{95} – диаметр частиц хвостов (шламов) соответствующей накопленной частоты 50 % и 95 %, м.

Если $v_0 > v_n$, то дальнейшая углубка прорана и его развитие в сторону отстойного пруда неизбежны.

3. Интенсивность расширения и углубки прорана на любой стадии его развития определяется массой хвостов, которые стекающая по нему в сторону низового откоса дамбы вода будет в состоянии транспортировать. Транспортирующая способность потока ρ_m (кг/м³) рассчитывается по формуле [9]:

$$\rho_m = 3(1 + \varphi) \frac{d_{95}}{h_0} \left(\frac{v_0^3}{v_n^3} - 1 \right) \left(1 - \frac{v_n}{v_0} \right), \quad (7)$$

где φ – параметр турбулентности.

4. После начала перелива воды через верхнюю бровку низового откоса дамбы (наклонный участок прорана) [4] на участке ее пересечения прораном вследствие резкого увеличения уклона параметры селевого потока существенно изменятся за счет:

- увеличения скорости течения;
- уменьшения толщины стока;
- увеличения транспортирующей способности потока.

Скорость движения воды по низовому откосу дамбы в общем случае определяется из формулы Шези [10], которая описывает связь средней скорости v (м/с) со средней глубиной и уклоном потока:

$$v_{Hi} = C \cdot \sqrt{h_{Hi} \cdot i_{Hi}} = \frac{h_{Hi}^{2/3} \cdot i_{Hi}^{1/2}}{n_c}, \quad (8)$$

где h_{Hi} – толщина слоя стока в проране на низовом откосе дамбы, м;

i_{Hi} – уклон низового откоса, ‰;

n_c – коэффициент шероховатости низового откоса, определялся из справочника [7].

Значение h_{Hi} находится из равенства расходов [4] при стоке воды i -го слоя через горизонтальную часть прорана (порог водослива) и его наклонную часть (низовой откос):

$$Q_i = 0,35 \cdot b_i \cdot \sqrt{2g} \cdot H_i^{3/2} = b_i \cdot h_{Hi} \cdot v_{Hi} = \frac{b_i \cdot h_{Hi}^{5/3} \cdot i^{1/2}}{n_c}, \quad (9)$$

откуда

$$h_{Hi} = \left(\frac{Q_i \cdot n_c}{b_i \cdot \sqrt{i}} \right)^{3/5}. \quad (10)$$

Значения турбулентных неразрывающих скоростей и транспортирующей способности потока вычисляются по формулам (6) и (7), соответственно.

При расчете развития гидродинамической аварии с образованием прорана принимаются следующие характеристики:

- значение расхода пульпы;
- физико-механические свойства и гранулометрический состав грунтов, слагающих пляжную зону и дамбы обвалования;
- объем каждого слоя сработки пруда и площадь зеркала отстойного пруда на отметке, соответствующей i -му слою;

– значения уклона пляжной зоны и заложений откосов дамб обвалования.

Таким образом, для того чтобы результаты расчетов, полученных с помощью программных продуктов, были наиболее достоверны, необходимо учитывать следующие позиции, влияющие на процесс формирования прорана, и которые необходимо подтвердить при дальнейшем изучении механизма развития гидродинамической аварии с образованием прорана на намывных ГТС промышленности:

1. Секционность накопителей жидких отходов промышленных предприятий. Различают накопители односекционные – состоящие из одной секции; двух- и более секционные – состоящие из двух и более секций (отсеков).

Оценка динамики разрушения [4] ограждающих дамб односекционных накопителей при снижении уровня воды в пруду после начала ее стока через проран описывается дифференциальным уравнением, справедливым при условии, что накопители имеют дамбы кольцевого типа [5] и у них нет дополнительного притока с водосборной площади:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{mb_t \sqrt{2g} (z_t - z_r)^{3/2}}{F(z)} \quad (11)$$

где z_t – отметка зеркала воды в пруду на момент времени t ;

z_r – отметка гребня дамбы до начала его понижения;

$F(z)$ – площадь зеркала воды в пруде при его отметке z ;

m – коэффициент водослива (прорана);

b_t – ширина прорана на момент времени t .

У накопителей, состоящих из системы отсеков, в верхнем отсеке при гидродинамической аварии оценка динамики разрушения ограждающих дамб будет описываться дифференциальным уравнением (11), а в нижерасположенных отсеках, когда гидродинамическая авария происходит в результате повышения уровня воды в их отстойных прудах за счет сброса воды из выше расположенных отсеков, то есть в накопитель будет поступать дополнительный приток воды, оценка динамики разрушения ограждающих дамб будет описываться следующим дифференциальным уравнением [4]:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{Q_0 - mb_t \sqrt{2g} (z_t - z_r)^{3/2}}{F(z)}, \quad (12)$$

где Q_0 – приток воды в пруд накопителя, м³/с.

Дифференциальное уравнение (11) справедливо для шламохранилища № 2 Богословского Аллюминиевого завода и Рогалевского отсека хвостохранилища Качканарского ГОКа, а уравнение (12) применяется для Промежуточного и Выйского отсеков хвостохранилища Качканарского ГОКа.

2. Начальная ширина прорана и расход зависят от выбранного сценария гидродинамической аварии. Например, при суффозионном размыве начальная ширина прорана приравнивается к участку, на котором скорость развития суффозионного размыва будет наибольшей из-за максимальной интенсивности намыва. При оползневых процессах начальная ширина прорана рассчитывается, исходя из параметров оползня (высоты и угла наклона откоса на оползневом участке дамбы), а при размыве ограждающей дамбы водным потоком, переливающимся через ее гребень, за начальную ширину прорана принимают протяженность участка, на котором уровень воды совпадает или превышает отметку основания валика.

3. Способ возведения дамбы. При намывном способе ограждающие дамбы обвалования возводятся поочередно из крупнозернистых отходов без уплотнения крупных фракций. Скорость формирования прорана будет значительно выше, чем при наливном способе возведения дамб, при котором ограждающие дамбы строятся сразу на полную высоту из связных грунтов путем их послойного уплотнения.

4. Тип грунтов, слагающих тело дамбы. На второй стадии формирования прорана [4], для несвязных грунтов характерно, что размыв низового откоса происходит с выполаживанием или увеличением его угла наклона до достижения им угла внутреннего трения, после чего смещение при размыве низового откоса происходит с сохранением угла внутреннего трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (РД 03-626-03): утв. Приказом Ростехнадзора от 01.08.2006. № 738.
2. Каганов Г.М., Волков В.И., Секисова И.А. Сравнение параметров волны прорыва, определенных различными методами // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 1. – С. 31–37.

3. Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности / ВНИИ ВОДГЕО. – М.: Стройиздат, 1986. – 128 с.
4. Расчет вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС хвостохранилища Качканарского ГОКа. / ЭЦ УГГГА. – Екатеринбург, 2005. – 58 с.
5. Расчет вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии ГТС шламохранилища № 2 Богословского Аллюминиевого завода филиала ОАО «Сибирско-Уральская алюминиевая компания» / ЭЦ УГГУ. – Екатеринбург, 2010. – 66 с.
6. Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02): утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 28.01.2002. № 6 в Минюсте РФ 16.04.02, регистрационный № 3372.
7. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. – Изд. 5-е. – М.: Энергия, 1974. – 313 с.
8. Методические рекомендации по расчету развития гидродинамических аварий на накопителях жидких промышленных отходов (РД 03-607-03): утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 05.06.03 № 51. Введены в действие с 01.08.03.
9. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 374 с.
10. Бебенина Т.П. Гидравлика. Техническая гидромеханика. Конспект лекций. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2006. – 180 с.

Сведения об авторах:

Шакирова Наталья Борисовна, ведущий инженер сектора гидротехнических сооружений, ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГУП РосНИИВХ), 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23; e-mail: nb61@yandex.ru

Морозов Михаил Григорьевич, к. т. н., заведующий сектором гидротехнических сооружений, ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург; e-mail: mg_frost@mail.ru

Комин Алексей Владимирович, к. т. н., научный сотрудник сектора гидротехнических сооружений, ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург