

Характеристики почвы ϵ_a и α_{sa} определяют форму кривой $\alpha \sim \epsilon$ общего вида. Величина ϵ_a указывает на расположение точки перегиба каждой конкретной кривой по отношению к началу нагружения почвы. Решив уравнение (9) относительно E и воспользовавшись выражением ϵ_a из (14), получим

$$\epsilon = \frac{\sigma_{sa}}{\epsilon_a} \left(\operatorname{ar th} \frac{\sigma - \sigma_a}{\sigma_{sa}} + \operatorname{ar th} \frac{\sigma_a}{\sigma_{sa}} \right). \quad (15)$$

Преобразуем уравнение (15), используя выражение

$$\operatorname{ar th} x = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} \quad (x^2 < 1). \quad (16)$$

и соотношения (12) и (13).

Тогда

$$\epsilon = \frac{1}{F} \ln \frac{\sigma_c - \sigma \sigma_s}{\sigma_s - \sigma \sigma_c}, \quad (17)$$

где $F = \frac{2}{E_a}$ — относительный коэффициент жесткости грунта.

Уравнения (17) совпадает с формулой, полученной на основе уточнения теории деформируемости грунта [3]. При выводе уравнений связи между на-

грузкой и деформацией принимают, что приращение силы пропорционально увеличению числа точек контакта частиц грунта, причем при сжатии их число увеличивается, а при сдвиге — уменьшается.

Решив уравнение (17) относительно α , получим

$$\sigma = \frac{\sigma_s \sigma_c [\exp(F\epsilon) - 1]}{\sigma_s + \sigma_c \exp(F\epsilon)}. \quad (18)$$

Итак, уравнения (11) и (18) описывают одну и ту же кривую. Им соответствуют разрешенные относительно ϵ эквивалентные уравнения (15) и (17). Описание уравнением (11) закономерности деформирования почвы более удобно для практического применения, чем уравнение (18).

Результаты исследования могут быть использованы при разработке расчетных способов определения характеристик взаимодействия машин и почвы.

Список литературы

1. Абуханов А.З. Механика грунта. — М.: Феникс, 2006. — 352 с.
2. Кезди А. Руководство по механике грунтов. — Будапешт: Изд-во Академии наук Венгрии, 1974. — С. 294.
3. Хан Х. Теория упругости. Основы линейной теории упругости и ее применения. — М.: Мир, 1988. — 344 с.

УДК 502/504:626/627:626.26

Жан Клод Мвуйекуре

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

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ИССЛЕДОВАНИЙ ТРУБЧАТЫХ СООРУЖЕНИЙ С ГАСИТЕЛЯМИ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

В практике современного гидротехнического строительства для крепления нижнего бьефа и обеспечения безопасного и надежного в эксплуатационном отношении отвода сбрасываемого потока в канал или в русло реки используются различные гасители энергии. Наиболее распространенными из них являются:

- водобойный колодец, образованный уступом за счет углубления дна флютбета;
- водобойный колодец, созданный водобойной стенкой;
- комбинированный водобойный колодец;
- водобойная плита, оборудованная гасителями, зубчатыми и прорезными порогами, растекателями;
- гасители ударного действия [1–5].

Применение гасителей ударного действия является одним из наиболее эффективных и надежных методов в борьбе с образованием местных размывов грунта за сооружениями в тех случаях, когда в нижнем бьефе имеет место дефицит глубин для

обеспечения гашения избыточной энергии. Подобные устройства нижнего бьефа еще недостаточно изучены, их конструкции продолжают совершенствоваться [5]. Они получили широкое распространение на гидроузлах США и Канады. Конструкция такого крепления с системой гасителей ударного действия была разработана в свое время Бюро мелиорации США. При создании этой конструкции был обобщен большой экспериментальный и натурный материал. В Московском гидромелиоративном институте (МГМИ) гасители ударного действия впервые были изучены в 1990 г. Е.Ф. Петровым под руководством И.С. Румянцева [3]. На основании результатов своих комплексных модельных лабораторных гидравлических исследований они создали новую рациональную конструкцию концевой гасителя ударного действия для трубчатых водопропускных сооружений, а также разработали методику ее расчетного обоснования и проектирования. Проведенные ими исследования позволили оптимизировать размеры этой конструкции [3]. Исследования Е.Ф. Петро-

ва и И.С. Румянцева были сделаны в полном объеме с двумя основными моделями гасителей энергии: гасителем Бюро мелиорации США (USBR) и гасителем модифицированной конструкции (рис. 1).

В конце выполненных ими испытаний они пришли к выводу, что гаситель энергии Бюро мелиорации США показал достаточно высокую эффективность гашения энергии потока в широком диапазоне изменения расходов и уровней воды в нижнем бьефе, но характер кинематической структуры потока на выходе из этого сооружения — неустойчивый, неравномерность планового распределения глубин и скоростей потока приводит к большим размывам и имеет место отсутствие стабильности течения и снижения эксплуатационной надежности; а предложенная Е.Ф. Петровым конструкция модифицированного гасителя энергии улучшала кинематическую структуру потока на выходе гораздо эффективнее, чем гаситель энергии Бюро мелиорации США [3]. Комплексные исследования гасителей энергии ударного действия позволили установить действительные диапазоны их рационального применения и углубить методику их расчетного обоснования. Авторы предлагали:

- продолжить исследования гидравлических условий работы конструкции ударного действия, состоящего из нескольких секций при симметричных и несимметричных сбросах;
- существенно расширить в дальнейших исследованиях диапазон изменения относительной ширины гасителя энергии B/D ;

- продолжить исследование гидравлических гасителей ударного действия, рассмотрев характер и величины гидравлических воздействий на элементы гасителей, используя для этого датчик-плиту;
- более подробно рассмотреть гидравлические условия работы гасителей энергии в широком диапазоне изменения характера течения потока в подводящем водоводе (от напорного до безнапорного);
- провести широкие исследования кинематических и турбулентных характеристик потока в нижнем бьефе; рассмотреть влияние на эти характеристики компоновочных и конструктивных особенностей гасителей, исследовать пространственную картину изменения этих характеристик при различных компоновочных схемах нижнего бьефа;
- углубить исследования размывающей способности потока и переформирования дна и откосов отводящего русла, выполняемого в различных грунтах [3].

Конструкция модифицированного гасителя была признана ВНИИГПЭ изобретением, она отличалась от гасителя Бюро мелиорации США в изменении формы нижнего козырька забральной балки. В конструкции этого гасителя козырек имел в плане вид усеченного по бокам треугольника. Вершина этого козырька расположена в плоскости симметрии гасителя энергии и направлена навстречу водному потоку. Боковым границам

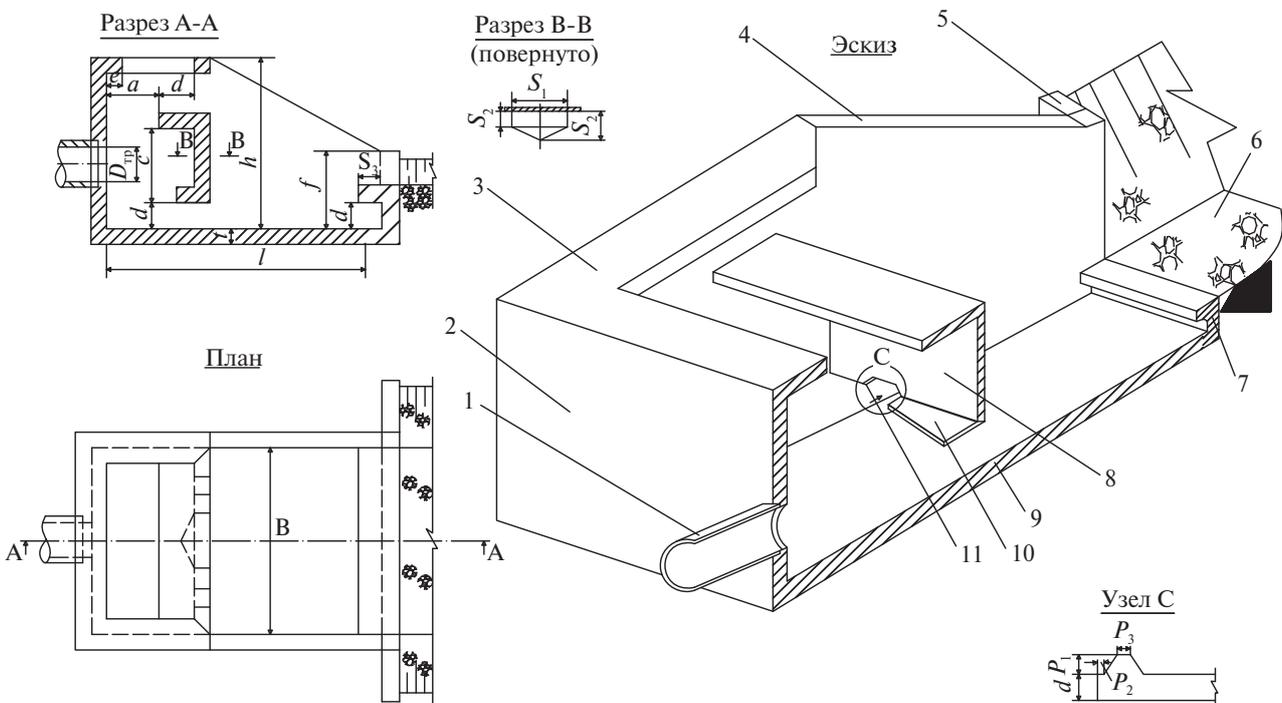


Рис. 1. Модифицированный гаситель энергии ударного действия:

- 1 — труба; 2 — торцовая стенка; 3 — образный козырек; 4 — боковая стенка; 5 — открьлок; 6 — отводящий канал; 7 — нижний козырек; 8 — забральная балка; 9 — дно камеры; 10 — концевой порог; 11 — вырез

козырька служат трапецеидальные вырезы 11. Выходной порог гасителя 10 выполнен с горизонтальной полкой в верхней части. В результате проведенных поисковых исследований были определены приблизительные размеры вновь предлагаемых элементов модифицированного гасителя энергии, т. е. нижнего козырька 7 и полки выходного порога 10, а также пределы изменения этих размеров. В целях достижения максимально равномерного планового распределения удельных расходов на выходе из модифицированного гасителя автоматами была осуществлена оптимизация его основных размеров в ходе двух серий математически спланированного эксперимента. Сравнительные данные гидравлических условий работы гасителя Бюро мелиорации и модифицированного гасителя показали, что эти гасители имеют примерно одинаковые гидравлические сопротивления; степени гашения избыточной энергии потока η этими гасителями могут быть определены следующим образом:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} 100 \% = 102,80 - 54,98\sqrt{F_1}$$

(гаситель USBR);

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} 100 \% = 103,40 - 52,46\sqrt{F_1}$$

(гаситель Румянцева–Петрова),

где E_1 и E_2 — полная удельная энергия потока перед и после гасителя.

Модифицированный гаситель ударного действия Румянцева–Петрова, с одной стороны, сохранял габаритные размеры и пропускную способность гасителя Бюро мелиорация США, но с другой — позволяет сформировать в отводящем канале более благоприятную, чем в случае с последним, кинематическую и турбулентную структуру потока, дает возможность выполнить более короткое крепление, а также повысить эксплуатационную надежность всего сооружения в целом.

В 1993 г. Мосбах Абдельхалим также продолжил исследования гасителей ударного действия под руководством И.С. Румянцева [1]. На основании результатов комплексных гидравлических исследований ими были разработаны конструктивные мероприятия и методы расчетного обоснования многосекционных гасителей ударного действия, а также выполнены исследования переформирований дна отводящего канала за трехсекционным гасителем ударного действия в условиях симметричных и несимметричных сбросов и составлены рекомендации по проектированию рассматриваемых гасителей (рис. 2).

Исследования гидравлических условий работы нижних бьефов и дна отводящего канала за трубчатыми водопропускными сооружениями, оборудованными в концевой части многосекционными гасителями ударного действия, были рассмотрены А. Мосбахом впервые. В результате этих исследований были получены конкретные предложения, внедрение которых в проектную практику позволит

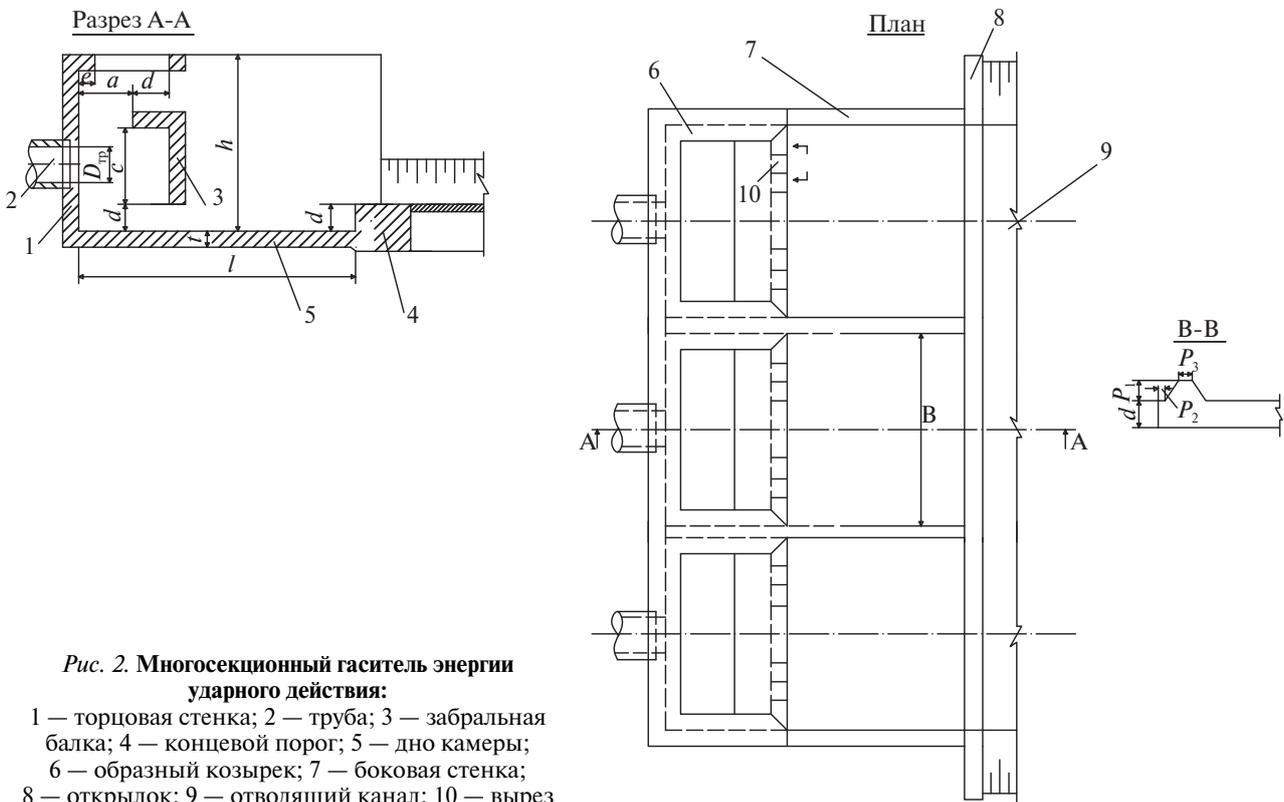


Рис. 2. Многосекционный гаситель энергии ударного действия:

- 1 — торцовая стенка; 2 — труба; 3 — забральная балка; 4 — концевой порог; 5 — дно камеры;
- 6 — образный козырек; 7 — боковая стенка;
- 8 — открьлок; 9 — отводящий канал; 10 — вырез

усовершенствовать методы проектирования и расчетного обоснования подобных сооружений. Это дало возможность полагать, что в рамках выполненных им исследований содержатся новые подходы к решению задачи проектирования нижних бьефов рассматриваемых гасителей, что позволит более обоснованно подходить к решению конкретных прикладных задач, связанных с дальнейшим их внедрением при гидротехническом строительстве. На основании проведенных экспериментальных исследований было подтверждено, что гасители ударного действия, построенные в концевых частях трубчатых водопропускных сооружений — перспективные конструкции, эффективные по решению традиционные задачи сопряжения бьефов. Эта конструкция простая, но результаты исследований показали, что нижние бьефы многосекционных гасителей ударного действия существенно сложнее, чем нижние бьефы одинарных гасителей такого типа. Авторы получили также данные об изменении коэффициентов кинетической энергии потока в этих случаях.

В ходе рассмотрения уже существующих гасителей энергии ударного действия был отмечен гаситель энергии ударного действия типа CSU [5]. Гаситель последнего типа представляет собой элементы искусственной шероховатости, создающие дополнительное сопротивление движущемуся потоку. Элементы искусственной шероховатости являются универсальным типом конструкции, поскольку могут использоваться как для воздействия и стабилизации гидравлического прыжка, так и для сокращения его длины. Эти конструкции используются внутри водопроводящих труб (сооружений), на выходе из них или в открытых каналах (рис. 3).

Используя расчетную схему, автор составил уравнение импульса, определяющее скорость выхода потока в канал, если наклон меньше 10%:

$$\rho V_0 Q + C_p \gamma (y_0^2 / 2) W_0 = C_B A_F N \rho v_A^2 / 2 + \rho v_B Q + \gamma Q^2 / (2 v_B^2 W_B),$$

где y_0 — глубина потока на выходе, м; V_0 — скорость на выходе из водовыпускных труб, м/с; W_0 — ширина (диаметр) выходного отверстия водовыпускных труб, м; v_A — скорость потока на расстоянии двойной ширины выходного отверстия водовыпускной трубы от концевой

участка последней, м/с; v_B — скорость потока на границе зоны крепления искусственной шероховатости, м/с; W_B — ширина гасителя на границе зоны крепления искусственной шероховатости, м; N — общее число элементов искусственной шероховатости; A_F — площадь поверхности гасителя, непосредственно взаимодействующая с потоком, м²; C_B — коэффициента аэродинамического сопротивления элемента искусственной шероховатости; C_p — импульс коэффициент для корректирования давление на выходе водовыпускных сооружений; γ — удельный вес воды, Н/м³; ρ — плотность воды, кг/м³.

Расширение (растекание) потока u_e является функцией от продольного расстояния между рядами элементов искусственной шероховатости L и ширины водопропускной трубы W_0 : $u_e = 4/7 + (10/7)L / W_0$ [5].

Сотрудник университета штата Колорадо, который изучал такой тип гасителя ударного действия (CSU), показал, что в конструктивном решении последнего применялись расставленные в шахматном порядке элементы искусственной шероховатости, инициирующие гидравлический прыжок. Автор этого типа гасителя провел испытания ряда конструктивных схем камер гасителя с различными плано-геометрическими конфигурациями элементов искусственной шероховатости, определяя при этом осредненную величину сопротивления и коэффициент шероховатости данной части камеры [5].

Проведенный анализ гидравлических условий работы гасителей ударного действия за концевыми частями трубчатых водовыпусков показал, что основными достоинствами рассматриваемых конструкций являются: простота конструкции, возможность ее применения даже в случаях отсутствия данных о характере изменения уровней воды в нижнем бьефе, включая случай работы на сухом нижнем бьефе, возможность эффективной работы гасителей на широком отводящем русле, эффективное гашение избыточной кинетической энергии потока, а также уменьшение размывов в нижнем бьефе сооружения. Основным недостатком данной конструкции гасителей является относительная сложность их устройства. В работе, выполненной А. Мосбахом, было отмечено, что кинематическая структура потока при выходе на рисберму

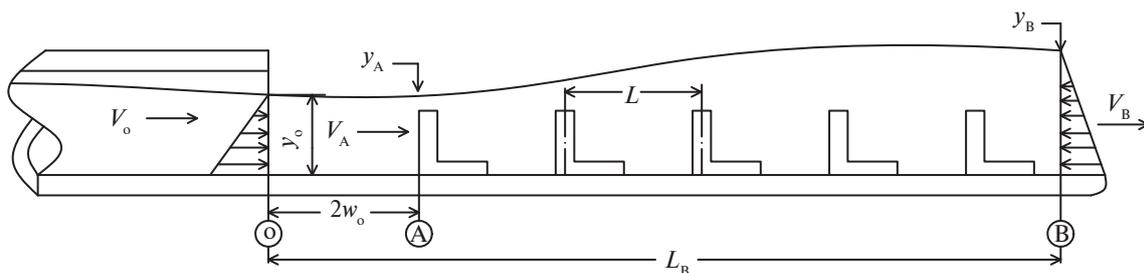


Рис. 3. Расчетная схема гасителя ударного действия типа CSU

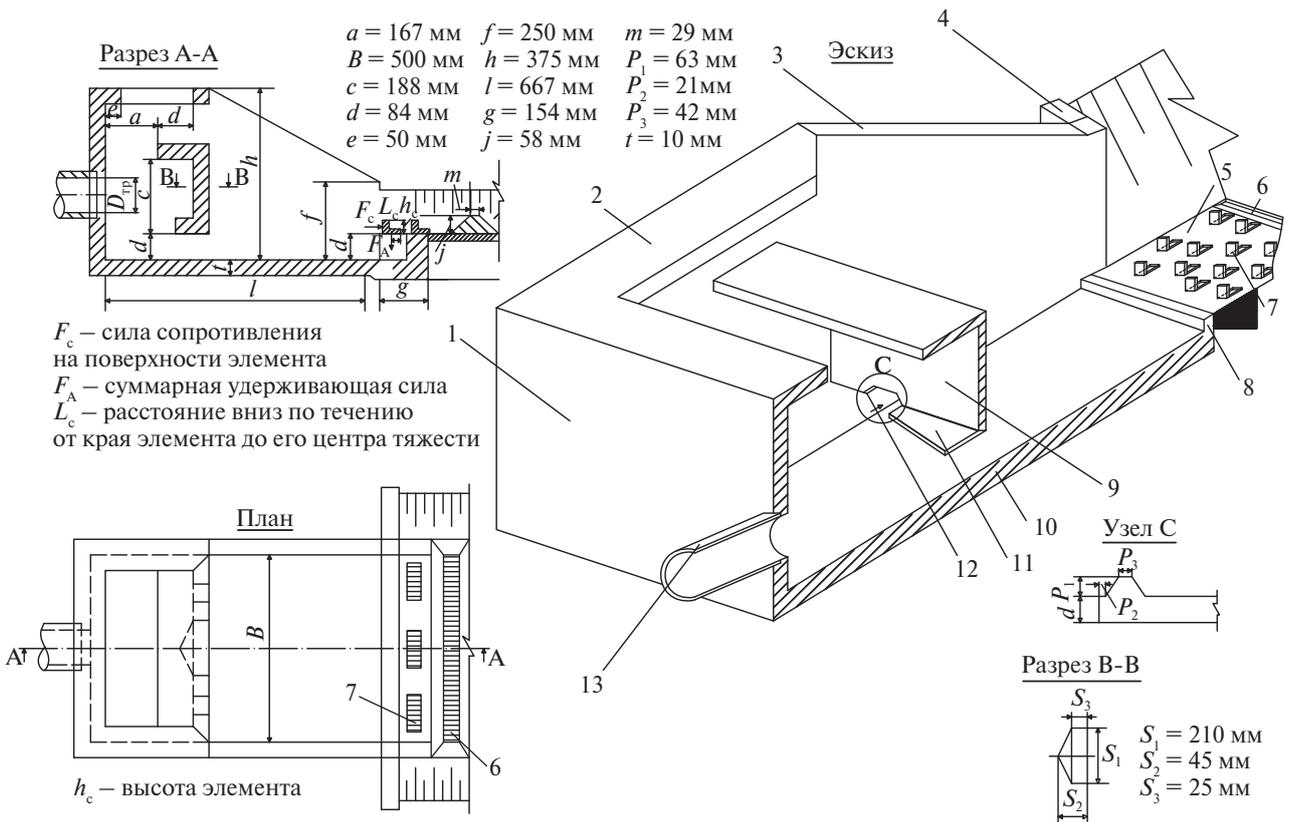


Рис. 4. Модифицированный многосекционный гаситель ударного действия с элементами шероховатости на рисберме и зубьями Ребока:

- 1 — торцовая стенка; 2 — образный козырек; 3 — боковая стенка; 4 — открылок; 5 — отводящий канал;
 6 — зубья Ребока; 7 — элементы шероховатости; 8 — концевой порог; 9 — забральная балка; 10 — дно камеры;
 11 — нижний козырек; 12 — вырез; 13 — труба

за трехсекционными гасителями недостаточно исследована, а существующие методики проектирования последних требуют уточнения, поэтому было принято решение о недостаточном исследовании гидравлических условий работы гасителей ударного действия, а также о необходимости изучения вопросов борьбы с образованием местных размывов. Для решения этих задач необходимо было оптимизировать конструкцию многосекционного гасителя ударного действия, что требует уточнения геометрических размеров этого гасителя и создания комплексной лабораторной модели. Модель была выполнена в масштабе 1:20 (рис. 4).

Выводы

Проведенные лабораторные исследования кинематики потока при данном модифицированном многосекционном гасителе ударного действия с элементами шероховатости на рисберме и зубьями Ребока позволяют утверждать, что пред-

лагаемая конструкция работоспособна. В опытах наблюдалась достаточно симметричная картина на расположения свободной поверхности потока на поперечных створах относительно продольной оси канала.

Список литературы

1. Мосбах А. Совершенствование конструкций и метод расчетов концевых частей трубчатых водопропускных сооружений с многосекционными гасителями ударного действия: дис. ... канд. техн. наук. — М., 1993, 160 с.
2. Леви И.И. Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1979. — 266 с.
3. Петров Е.Ф. Гаситель энергии ударного действия в концевых частях трубчатых водопропускных сооружений: дис. ... канд. техн. наук. — М., 1990. — 242 с.
4. Гидротехнические сооружения / Под ред. Н.П. Розанова. — М.: Агропромиздат, 1985. — 432 с.
5. Federal Highway Administration «Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels», publication No. FHWA-NHI-06-086, July, 2006.