



ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии показано, какие трудности возникают при решении, казалось бы, простой проблемы обеспечения перевода потока из подводящего русла в водоотводящую трубу или канал. Показано также, что особые затруднения встречаются при проектировании необходимых конструкций, когда исходный поток находится в бурном состоянии. С аналогичными трудностями встречаются инженеры не только дорожного профиля. Подобные затруднения встречаются и на пути ученых и инженеров, например, авиационного профиля, когда необходимость учета поведения воздушных потоков при обтекании летательных аппаратов при больших скоростях заставила для достижения успеха развить теорию пограничного слоя, скачков уплотнения и т. д.

В пособии широко используются результаты научно-исследовательских работ, выполненных по заданию РОСАВТОДОРА с целью выявления работоспособности косогорных гофрированных труб и типовой системы водоотведения с проезжей части автомобильных дорог с использованием телескопических водоотводящих лотков. Обобщение полученных данных экспериментальных исследований, выполненных в гидравлической лаборатории СГТУ им. Ю. А. Гагарина, еще не отражено в современной учебной литературе. Тем не менее их учет совершенно необходим в связи с реальной угрозой проявления последствий игнорирования при проектировании особенностей

взаимодействия бурных потоков с водопропускными сооружениями. Содержание учебного пособия во многом исправляет этот недостаток и вооружает будущих специалистов необходимыми знаниями и умениями.

Авторы стремились довести до сознания обучающихся, как на протяжении многих лет кропотливый труд большого отряда исследователей, ученых, проектировщиков проводил по крохам пополнение знаний в раскрытии самого понятия о взаимодействии бурных потоков с водоотводящими конструкциями. Авторы не сомневаются в том, что читателям вполне понятна необходимость участия в решении рассматриваемой проблемы представителей многих направлений в науке (гидравлике, механике жидкости и газа, гидрологии, гидротехнике и т. д.), проектировании и изысканий (автомобильных дорог, аэродромов, мостов и тоннелей, гидротехнических и гидромелиоративных сооружений). Тем не менее еще нельзя констатировать ее окончательное решение.

Авторы надеются, что найдутся активные студенты, читатели, аспиранты, которых заинтересуют понятия, изложенные в учебном пособии, и которые потратят свои силы и способности на совершенствование существующих методов.

Учебное пособие рассчитано на широкий круг читателей:

- студентов и бакалавров дорожно-строительных специальностей, строителей мостов и тоннелей, гидротехнических и гидромелиоративных сооружений при изучении методов проектирования систем водоотвода из нагорных канав, полотна автомобильных дорог, дамб и т. п. сооружений;
- магистров при изучении проблем учета особенностей взаимодействия бурных потоков со специальными конструкциями, предназначенными для управления их движением;
- аспирантов, специализирующихся в указанном направлении;
- инженеров-проектировщиков, которым приходится в своей деятельности уделять внимание рассмотренным

сооружениям в силу их массовости. К сожалению, их знаний для этого часто оказывается недостаточно.

Учебное пособие предназначено для использования при изучении дисциплин, в которых в некоторой мере рассматриваются проблемы водоотведения с проезжей части автомобильных дорог. К таким относятся дисциплины «Гидравлика и гидрология», «Инженерная гидрология» федерального компонента ГОС ВПО и курса «Сооружения поверхностного и подземного водоотвода» в составе дисциплины «Основы проектирования автомобильных дорог», представленной в составе специализации «Автомобильные дороги» специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» направления подготовки дипломированных специалистов «Транспортное строительство» и дисциплин «Гидравлика» в составе блока обязательных дисциплин вариативной части математического и естественнонаучного цикла и «Изыскания и проектирование автомобильных дорог и аэродромов» в составе блока обязательных дисциплин вариативной части профессионального цикла рабочего учебного плана, разработанного СГТУ им. Ю. А. Гагарина для направления подготовки бакалавров «Строительство» (профили подготовки: «Автомобильные дороги», «Автодорожные мосты и тоннели»).

Кроме того, учебное пособие предназначено для использования при курсовом проектировании, УНИРС, выполнении специальных лабораторных работ, дипломном проектировании и подготовке магистерских диссертаций.



СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- a_Γ, Δ_Γ — высота гофров
 B — ширина подводящего быстротока
 b — ширина участка сужения на выходе
 c — волновая скорость
 C — коэффициент Шези
 d, r_0 — диаметр и радиус трубы
 e — степень аэрации
 g — ускорение свободного падения
 h — глубина
 h_Γ — глубина под гребнем
 i_0 — уклон дна
 K_0 — расходная характеристика
 k — гидравлический показатель русла
 ℓ_Γ — шаг гофров
 L, l — длина
 m — масштаб моделирования; коэффициент заложения откосов
 n — коэффициент шероховатости
 Q_p — расчетный расход
 R — гидравлический радиус
 Re, Fr — числа Рейнольдса и Фруда
 S — площадь живого сечения
 V — скорость
 X — длина вдоль оси x
 α — коэффициент кинетической энергии
 β — угол поворота стенки
 δ — волновой угол
 Δ — высота выступа шероховатости
 λ — коэффициент Дарси
 χ — смоченный периметр
 k — постоянная Кармана
 η — относительная глубина
 Π — формпараметр устойчивости течения



ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени изделия в виде металлических гофрированных труб нашли весьма широкое распространение в различных отраслях строительства (дорожно-транспортное, гражданское, гидротехническое, гидромелиоративное и т. п.). Объясняется это тем, что они имеют многие преимущества по сравнению с аналогичными изделиями из других материалов.

История применения сборных металлических гофрированных конструкций насчитывает более 100 лет, начиная с конца XIX в. В России первые опытные сооружения были разработаны и изготовлены на Петербургском металлическом заводе. Металлические гофрированные трубы были, в частности, использованы в 1875 г. в России при строительстве железных дорог. После заводских испытаний и опытного строительства труб из волнистого оцинкованного железа было уложено за 1887–1888 гг. около 1300 м (диаметром 0,53–1,07 м) на Закаспийской железной дороге [23]. Положительные результаты их эксплуатации привели к решению Инженерного совета МПС (1896) о расширении применения труб из гофрированного металла. За 1887–1914 гг. было построено примерно 5000 сооружений и использовано около 64 000 м металлических гофрированных труб (рис. В.1).

При строительстве автомобильных дорог они почти не применялись. Помимо Петербургского металлического завода с 1900 г. гофрированные трубы выпускались Прушковским заводом около Варшавы.



Рис. В.1
Труба отверстием 2,13 м, построенная в 1903 г.
на Среднеазиатской железной дороге

В [23] приведены сведения о результатах обследования состояния металлических гофрированных труб, выполненного в 1913 г. (свыше 60 000 м). Более 93% из них имели удовлетворительное состояние. Повторному обследованию в 1941 г. были подвергнуты 2334 водопропускных трубы на Ташкентской ж.-д. Оказалось, что после 26–54-летней эксплуатации 90% труб остались в удовлетворительном состоянии. Большинство труб имело лоток из слоя бетона толщиной 1–5 см над вершиной гофра и шириной, равной 1/3–1/2 внутреннего периметра трубы.

В США аналогичные трубы были применены впервые в 1896 г. Однако широкое их использование во многих странах началось лишь во второй половине прошлого века. В настоящее время строительство металлических гофрированных труб получило распространение в самых разнообразных климатических условиях (Канада, Аляска, Африка и Азия). Используют их и для пропуска значительных расходов малых и средних рек.

Наиболее экономичными считаются трубы диаметром до 6–7 м. В [23] приведено достаточно интересных сведений из технологии изготовления и строительства гофрированных труб из металла, однако особенностям их гидравлического расчета отведено менее двух страниц. Они сводятся к утверждениям:

- расчет металлических гофрированных и железобетонных труб ведется по единой методике;
- устройства входного оголовка лучше избегать;
- коэффициент шероховатости предлагается принимать по американским лабораторным данным (см. табл. 1 в [23]).

Нельзя сказать, что отечественные ученые и специалисты в области дорожно-транспортного строительства уделяли недостаточно внимания перспективе широкого внедрения изделий из металлических гофрированных структур. Так, в 1971 г. ЦНИИС выпустил нормативный документ [18] «Технические указания по проектированию, изготовлению и постройке металлических гофрированных водопропускных труб на железных и автомобильных дорогах» (ВСН 176-71). В 1985 г. «Ленгипротрансмост» выпустил рабочие чертежи на трубы отверстием 1–3 м. Трубы с большими отверстиями начали применяться лишь во второй половине 90-х гг. прошлого века в импортном исполнении. В настоящее время шведско-финско-российская компания ЗАО «Геотерра», входящая в концерн ViaCon, предлагает широкий спектр изделий из металлических гофрированных структур, в том числе и водопропускные трубы различной формы сечения диаметрами от 1,0 до 15 м. В рекламном проспекте этой компании [32] к числу преимуществ этих конструкций отнесены:

- прочность и достижение совместной работы металла и грунта (засыпки);
- долговечность;
- низкая стоимость (сокращение затрат до 30–50%);
- простота и быстрота строительства;
- удобство и экономичность транспортировки;
- экономичность эксплуатации;
- разнообразие форм и размеров;
- возможность строительства в любых климатических условиях.

Разработанные ЦНИИС в 1967 г. «Методические указания по гидравлическому расчету косогорных труб» [25] предусматривают использование гладких труб прямоугольного и, частично, круглого сечения при сопряжении их

с быстротоком прямоугольного и трапецидального сечения.

Тем не менее можно отметить, что развернувшееся в нашей стране гидротехническое и гидромелиоративное строительство в невиданных масштабах привело к необходимости выполнить многочисленные и тщательные теоретические и экспериментальные исследования бурных потоков. Они выполнялись многими НИИ и вузами. К числу наиболее выдающихся коллективов можно отнести «Гидропроект», ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, ТНИСГЭИ, САНИИРИ, Союзгипроводхоз, ЦНИИС и многие другие, а из кафедр гидравлики и гидросооружений вузов — МИСИ, МИИТ, МАДИ, ЛПИ, МГМИ, МЭИ, СарПИ и др. Накопленные теоретические и экспериментальные результаты были обобщены в монографиях, руководствах и другой специальной литературе [10]–[13] и др.

Л. И. Высоцкий занимается исследованиями бурных потоков с 1957 г. Его теоретические и экспериментальные результаты широко известны и вошли в ряд фундаментальных изданий [10], [12], [13].



ГЛАВА ПЕРВАЯ

КРАТКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ И МЕТОДОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОСОГОРНЫХ ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ

1.1. ДОСТИЖЕНИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИИ ГИДРАВЛИКИ БУРНЫХ ПОТОКОВ

По мере расширения потребности развивающейся промышленности и сельского хозяйства, необходимости получения все больших объемов дешевой энергии и других обстоятельств возрастила роль водных потоков в их использовании для решения перечисленных выше проблем. В частности, от первоначального использования водных потоков с целью самотранспортирования воды к месту потребления наметился переход к получению с их помощью дешевой энергии (впоследствии и электроэнергии). Расширение применения водных потоков привело к необходимости решения и экономических задач для удешевления строительства водных магистралей, водных сетей, а затем гидроэнергетических узлов, гидромелиоративных систем и т. п. Стремление сэкономить средства за счет уменьшения поперечных сечений водопропускных сооружений, в том числе каналов, привело к пропуску все более скоростных потоков. В свою очередь, указанное обстоятельство потребовало применения все более прочных материалов для облицовки каналов, тоннелей и т. д. Решение

этих проблем оказалось невозможным без надлежащих гидравлических и других сооружений, контактирующих с высокоскоростными потоками. Ясно, что разработка практических рекомендаций невозможна без опережающего развития теории, в данном случае гидравлики высокоскоростных потоков.

После того, как было выявлено различное поведение водных потоков в зависимости от их состояния, названное *спокойным* и *бурным*, что определяется величиной критерия числа Фруда

$$Fr = \frac{V^2}{gh} \geq 1, \quad (1.1)$$

наметилось раздельное изучение особенностей их реакции при взаимодействии с твердыми поверхностями. В частности, было установлено, что при попытке уменьшить ширину бурного потока ($Fr > 1$) путем излома боковой стенки поворотом ее на угол β внутрь потока из точки излома исходит косая волна (косой гидравлический прыжок), которая обладает набором волновых свойств, т. е. способностью отражаться от твердых поверхностей, складываться с другими волнобразованиями и т. п.

Оказалось, что эти явления связаны с соотношением скорости течения с волновой скоростью $c = \sqrt{gh}$. Оно может быть записано так

$$\begin{aligned} u \geq c \text{ или } u \geq \sqrt{gh}, \text{ или } \frac{u}{\sqrt{gh}} \geq 1, \\ \text{или } \frac{u_2}{gh} \geq 1, \text{ или } Fr \geq 1. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Состояние, когда $Fr = 1$, называют критическим состоянием потока. Если $Fr < 1$, то поток называют докритическим или спокойным. Соответственно, если $Fr > 1$, его называют суперкритическим или бурным.

Так как скорость распространения поверхностных возмущений равна $c = \sqrt{gh}$, то в бурном потоке поверхностные возмущения не могут распространяться вверх по течению, а область их распространения ограничена прямой, исходящей из точки излома стенки (при очень малом угле поворота $\Delta\beta$) под углом δ_1 , причем

$$\delta_1 = \arcsin \frac{1}{\sqrt{Fr_1}}, \quad (1.3)$$

где $Fr_1 = \frac{u_1^2}{gh_1}$ — число Фруда набегающего потока. Сказанное справедливо при условии $u_1 = \text{const}$ и $h_1 = \text{const}$.

Упомянутая линия называется линией возмущения или линией Маха.

Попытка увеличить угол поворота стенки на больший угол приводит к возникновению косого гидравлического прыжка, угол которого δ со скоростью набегающего потока оказывается большим δ_1 , а высота его оказывается существенно большей h_1 . Ниже по течению за косой волной глубина h_2 также оказывается большей h_1 , а скорость $u_2 < u_1$. Число Фруда $1 < Fr_2 < Fr_1$.

Начальные попытки инженеров игнорировать эти особенности бурных потоков и обойти соответствующие трудности простыми средствами, например, устройством участков сужения с ломаной и плавной (как им казалось) формой, назначаемой по наитию, не привели к ожидаемым результатам. Это можно проиллюстрировать фото волнообразований на свободной поверхности бурного потока,

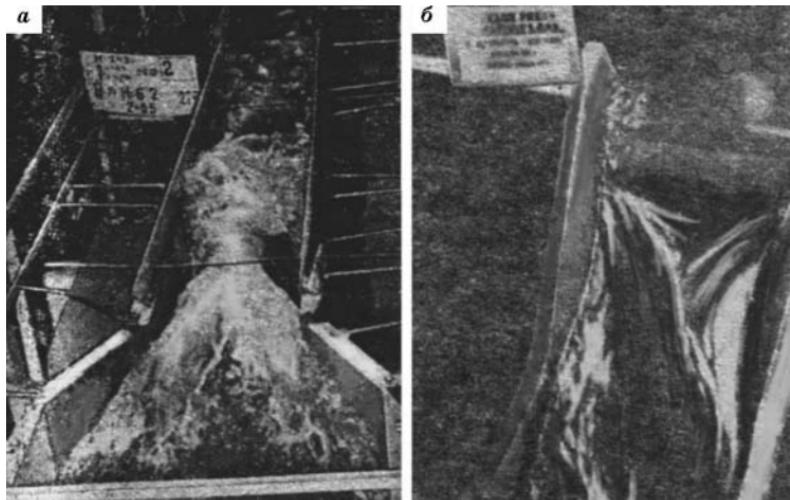


Рис. 1.1
Работа сужающего участка с ломанными стенками (а) и волнообразования на модели быстротока плотины Маркес (б)

проходящего через участок сужения с ломанными и плавным очертанием боковых стенок, и их распространение в отводящем русле (рис. 1.1). То же можно усмотреть и на рисунке 1.2. На рисунке 1.3 показана свободная поверх-

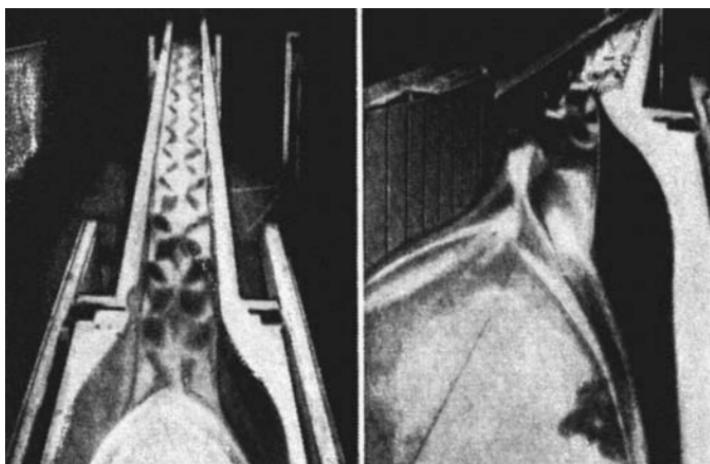


Рис. 1.2
Работа сужающего участка с криволинейными стенками



Рис. 1.3
Волнообразования на участке поворота
быстротока

ность бурного потока, который пытались повернуть, казалось бы, достаточно аккуратно.

Тем временем скорости водных потоков в водопропускных сооружениях росли и стали достигать 20–50 м/с. Неприятности, происходящие от особенностей течения бурных потоков, оказались труднопреодолимыми и неприемлемыми. Это заставило обратиться к серьезным теоретическим исследованиям высокоскоростных потоков. Оказалось, что существует глубокая, так называемая *газогидравлическая аналогия* между течениями несжимаемой и сжимаемой жидкостями. Причем спокойные потоки оказались (в определенном смысле) эквивалентны дозвуковым течениям, а бурные — сверхзвуковым течениям газа.

Поскольку развитие авиации, ракетостроения, судостроения исторически шло опережающими темпами, то в этих отраслях намного раньше осознали роль теории в развитии прикладных методов, необходимых при проектировании, и необходимость использования радикальных выводов теории. Сказанное легко понять, если вспомнить виденные нами кадры, демонстрирующие полеты самолетов на заре развития воздухоплавания. Например, форма фюзеляжа мало отличалась от простейшего ящика. Существенная трансформация формы фюзеляжа (удобообтекаемая) и сечения крыла (профиль Жуковского) привела к невиданному скачку в качестве проектирования и строительства летательных аппаратов. Как это ни курьезно звучит, но сантехники при поиске формы поверхности унитаза экспериментальным путем также были вынуждены использовать достаточно сложные очертания, представляющиеся не слишком удобными с точки зрения технологии их изготовления. Этот путь перехода на все более выгодные с точки зрения эксплуатации формы можно было проследить на самых разнообразных изделиях: кузова обычных и гоночных автомобилей, дирижаблей, проточных частей запорных устройств и др.

Гигантское развитие гидроэнергетического строительства во всем мире и небывалые его темпы в нашей стране потребовали создания мощных научных коллективов, таких как НИС Гидропроекта, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева,

подключение большого числа кафедр и лабораторий ведущих вузов страны: ЛПИ, МЭИ, МАДИ, СПИ, КАДИ и др.

Использование и развитие достижений в газовой динамике применительно к гидравлике высокоскоростных (бурных) потоков было осуществлено такими учеными, как А. Иппен, Н. Т. Мелещенко, С. Н. Нумеров, Г. И. Сухомел, А. Д. Гиргидов, Ф. И. Франкл, Б. Т. Емцев, И. А. Шеренков и др. Их разработки базировались на теории двумерных идеализаций бурных потоков. В частности, Б. Т. Емцев и его ученики предложили методы расчета участков сужения бурного потока с помощью криволинейных стенок. Они были построены на применении метода характеристик и взаимодействия волн возмущений двух видов — повышения и понижения. Основным преимуществом предложенных участков сужения являлось отсутствие косых волн в их пределах и в отводящем русле. Однако оказалось, что для достижения такого эффекта длина участков сужения должна быть достаточно (иногда неприемлемо) большой. Более того, при пропуске нерасчетных расходов косые волны все-таки образуются и проникают в отводящий канал (рис. 1.1). А. Иппен, подробно изучивший образование косых волн в двумерной постановке [46], пришел к выводу, что участки с криволинейными боковыми стенками всегда имеют большую протяженность, чем участки сужения с плоским дном и ломаными боковыми стенками. Совместно с Даусоном он предложил так называемые «безволновые» участки сужения, за которыми волнобразования должны отсутствовать. Оказалось, что это не вполне соответствует действительности, но участок сужения по А. Иппену и Даусону [47] имеет все-таки преимущество перед другими из-за относительно малой их высоты.

Дальнейшие углубленные исследования сужения бурного потока на участках с плоским дном и ломанными стенками отечественными учеными В. Г. Вереземским, А. А. Турсуновым показали, что форма сечения косой волны достаточно далека от применяемой в двумерной идеализации бурного потока ступенькообразной формы. При использовании разработок В. В. Смыслова, А. М. Тер-Крикорова, Н. Н. Моисеева, а также точных решений по «уединенным» волнам

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru