К. А. АКУЛОВЪ.
ИНЖЕНЕРЪ ПУТЕЙ СООБЩЕНІЯ.
Преподаватель Кіевскаго Политехническаго Института
ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА II.

МАТЕРІАЛЫ

ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНІЯ ФРАНЦУЗСКИХЪ ВОДОПОДЪЕМНЫХЪ ПЛОТИНЪ

системъ

Поаре, Шаноана и Дефонтена.

СЪ РИСУНКАМИ ВЪ ТЕКСТѢ.

КІЕВЪ.
Типографія С. В. Кульженко. Пушкинская ул., домъ № 4.
1902.

Дозволено Цензурою. Кіевъ, 24 Іюля 1902 г.

Предисловіе.

Настоящій трудъ имѣетъ своей цѣлью служить пособіемъ для студентовъ при проектированіи ими французскихъ водоподъемныхъ плотинъ. Отсутствіе въ русской технической литературѣ руководствъ по этому вопросу кромѣ труда проф. Ѳ. Г. Зброжека „Курсъ внутреннихъ водяныхъ сообщеній" и труда проф. В. Е. Тимонова „Водоподъемныя плотины системы Пуаршь-Дефонтена", гдѣ главнымъ образомъ разбирается конструкція вышеуказанныхъ плотинъ, вынуждало студентовъ постоянно обращаться къ французскимъ источникамъ, при чемъ затрачивалось много труда на переводъ и отысканіе именно тѣхъ свѣдѣній, которыя нужны для даннаго проекта.

Чтобы сократить нѣсколько этотъ трудъ для студентовъ, нами выбраны изъ „Курсовъ внутреннихъ водяныхъ сообщеній", инженеровъ Lagréné и Guillemain'a, а также и изъ нѣкоторыхъ другихъ иностранныхъ источниковъ главнѣйшіе матеріалы для расчетной части проекта. Позволяемъ себѣ надѣяться, что нашъ трудъ встрѣтитъ сочувствіе со стороны тѣхъ, для кого онъ предназначенъ.

Часть I.

Составныя части шлюзовой плотины.

Французскія разборчатыя плотины при всемъ разнообразіи системъ затворовъ, перекрывающихъ отдѣльныя ихъ отверстія, подчиняются нѣкоторымъ общимъ требованіямъ, выясненіемъ которыхъ мы и займемся. Каждая шлюзовая плотина съ первыхъ-же лѣтъ изобрѣтенія разборчатыхъ затворовъ состояла вообще изъ слѣдующихъ частей:

1. Шлюза, расположеннаго въ рѣчномъ руслѣ около того изъ береговъ, на которамъ проведенъ бичевникъ.

2. Судоходнаго отверстія, по которому суда направляются въ періодъ, когда глубина рѣки въ ея свободномъ состояніи удовлетворяетъ потребностямъ судоходства. Это отверстіе примыкаетъ обыкновенно къ низовой головѣ шлюза. Для образованія подпора оно закрывается подвижными фермами.

3. Водослива, состоящаго изъ постоянной части, гребень которой возвышается на нѣкоторую величину надъ дномъ рѣки, и подвижныхъ затворовъ, которые вмѣстѣ съ затворами судоходнаго отверстія поддерживаютъ опредѣленный подпоръ выше плотины.

Отъ судоходнаго отверстія водосливъ отдѣляется быкомъ, при чемъ въ планѣ ему даютъ расположеніе нормальное или наклонное къ теченію, смотря потому, какое направленіе желаютъ придать выходящей водѣ.

Въ нѣкоторыхъ частныхъ случаяхъ въ составъ одной и той-же плотины могутъ войти нѣсколько шлюзовъ, судоходныхъ отверстій и водосливовъ. Нѣкоторые водосливы могутъ состоять изъ одной только постоянной части, или же могутъ имѣть порогъ ниже даже судоходнаго отверстія. Такіе частные случаи мы разсмотримъ впослѣдствіи, а пока займемся болѣе подробнымъ разборомъ плотины, представляющей по своимъ составнымъ частямъ наиболѣе распространенный на практикѣ типъ.

Соображенія, которыми слѣдуетъ руководиться при выборѣ мѣста для плотины.

При возведеніи любой шлюзовой плотины прежде всего является вопросъ о выборѣ мѣста для нея. Вопросъ этотъ очень сложный, и для рѣшенія его наивыгоднѣйшимъ образомъ нужно освѣтить его со всѣхъ сторонъ. Если на рѣкѣ имѣется сильно выступающая мель, состоящая изъ каменной гряды, то удобно расположить плотину на низовой части этой гряды выше слѣдующаго плеса. За неимѣніемъ каменистаго основанія плотину предпочтительнѣе основывать на крупномъ гравіи, чѣмъ на глинѣ или пескѣ. Такое расположеніе плотины выгодно въ томъ отношеніи, что при немъ обыкновенно не приходится съ низовой стороны ея дѣлать искусственный подходъ посредствомъ землечерпанія. Если берега въ нѣкоторыхъ мѣстахъ около плотины настолько низки, что подпертая вода можетъ ихъ затопить на значительное протяженіе, то лучше искать мѣста для плотины выше по теченію. Возведеніе продольныхъ дамбъ для защиты береговъ вообще нежелательно, такъ какъ во первыхъ оно значительно удорожаетъ стоимость плотины, а во вторыхъ въ случаѣ прорыва ихъ грозитъ большими бѣдствіями прибрежнымъ жителямъ. Если на рѣкѣ имѣется притокъ, движущую силу котораго эксплоатируетъ заводъ, расположенный близко отъ его устья, то предпочтительнѣе плотину расположить выше этого притока, такъ какъ съ поднятіемъ горизонта заводъ теряетъ ту движущую силу, которая для него стбитъ обыкновенно очень дорого. Не слѣдуетъ устраивать плотинъ около городовъ, такъ какъ это не только стѣсняетъ движеніе судовъ, но и нежелательно въ санитарномъ отношенiи, такъ какъ качество воды какъ вслѣдствiе уменьшенiя уклона, такъ и постоянныхъ колебанiй горизонта значительно ухудшается. Лучше располагать плотину нѣсколько ниже по теченiю съ тѣмъ, конечно, условiемъ, чтобы она не мѣшала стоку городскихъ водъ, коллекторы которыхъ должны быть выведены ниже плотины. Не слѣдуетъ возводить плотины ни въ слишкомъ узкомъ, ни въ слишкомъ широкомъ мѣстѣ рѣки: въ первомъ случаѣ является опасность, что живое сѣченiе постоянными частями плотины будетъ стѣснено настолько, что окажется недостаточнымъ для пропуска паводка, а во второмъ случаѣ придется произвести непроизводительно большiя затраты, такъ какъ для сообщенiя между берегами потребуется придавать сооруженiямъ длину бо́льшую, чѣмъ это требуется для режима рѣки.

Опредѣленiе разстоянiя между двумя сосѣдними плотинами, входящими въ составъ одной канализацiи.

Когда мы имѣемъ дѣло съ цѣлымъ рядомъ плотинъ, входящихъ въ составъ одной канализацiи, прибавляются еще нѣкоторыя новыя условiя при выборѣ мѣстъ для плотинъ. Прежде всего необходимо, чтобы дѣйствiе подпора каждой плотины простиралось до слѣдующей вышележащей и обезпечивало-бы необходимую судоходную глубину какъ на всемъ протяженiи рѣки между разсматриваемыми плотинами, такъ и на низовомъ королѣ вышележащей, при чемъ непремѣнно долженъ быть нѣкоторый запасъ судоходной глубины, такъ какъ нерѣдко замѣчались совершенно неожиданныя паденiя горизонта ниже принятаго за самый низкiй.

Постараемся выяснить, какая существуетъ зависимость между уклономъ рѣки, высотою подпора плотины и разстоянiемъ между разсматриваемой плотиной и смежной вышележащей.

Поверхность воды выше плотины, очевидно, имѣетъ видъ нѣкоторой кривой. Если видъ этой кривой будетъ извѣстенъ, то можно будетъ дать отвѣтъ на вопросы, до какого мѣста простирается дѣйствіе подпора плотины, и на какую судоходную глубину можно расчитывать на этомъ протяженіи во все время, пока плотина закрыта. Отсюда-же можно опредѣлить и то разстояніе, на которое должна отстоять данная плотина отъ другой вышележащей, чтобы на всемъ протяженіи между ними была обезпечена извѣстная, напередъ заданная, судоходная глубина.

Для большей простоты разсужденій предположимъ, что подпоръ распространяется по горизонтальной прямой, проходящей черезъ его вершину и оканчивается въ точкѣ пересѣченія его съ прямою поверхностнаго укпона потока въ его естественномъ состояніи. Для судоходства предположеніе это не только безопасно, но даже выгодно, потому что дѣйствительная глубина окажется бо́льше получаемой расчетомъ.

Вышеуказанная горизонтальная линія подпора должна, очевидно, быть выше короля и флюдбета вышележащаго шлюза на величину равную желательной судоходной глубинѣ.

Выразимъ это алгебраически, принявъ слѣдующія обозначенія:

S — горизонтальное разстояніе между двумя послѣдовательными плотинами.

i — поверхностный уклонъ потока въ его естественномъ состояніи.

Y — подпоръ у низовой плотины надъ самымъ низкимъ горизонтомъ при закрытомъ ея состояніи.

h — глубина воды, считая отъ самаго низкаго горизонта, на низовомъ королѣ шлюза верхней плотины.

M — минимальная судоходная глубина, которая должна быть послѣ устройства канализаціи рѣки.

Между этими величинами должно существовать соотношеніе:

$$Y - Si + h = M$$

Такъ какъ нѣкоторыя изъ величинъ, входящихъ въ это равенство, могутъ варьировать въ довольно широкихъ предѣлахъ, то наиболѣе удачное рѣшенiе вопроса можетъ быть получено только путемъ сравненiя цѣлаго ряда комбинацiй. Замѣтимъ, что равенство наше мы можемъ замѣнить неравенствомъ

$$Y - Si + h > M,$$

если только небольшое увеличенiе глубины на королѣ шлюза верхней плотины позволяетъ помѣстить нижележащую плотину въ болѣе удобномъ мѣстѣ.

Перейдемъ теперь къ изслѣдованiю величинъ M, Y, S и h.

Судоходная глубина.

Судоходной глубиной называется та минимальная глубина, которую рѣка должна имѣть въ любой точкѣ ея судового хода. Если обратиться къ французскимъ рѣкамъ, то тамъ эта глубина взята на 0,30 метр. болѣе наибольшей осадки судовъ, а на каналахъ по совѣту Gauthey запасъ дѣлается еще болѣе.

Вообще слѣдуетъ проектировать такую судоходную глубину, которая принята для самаго глубокаго изъ водныхъ путей, примыкающихъ къ проектируемому, или могущихъ быть съ нимъ соединенными.

Изслѣдованiе какъ выполненныхъ, такъ и проектированныхъ работъ по канализацiи рѣкъ указываетъ на постоянное стремленiе къ увеличенiю осадки судовъ.

И такъ судоходная глубина, вообще говоря, есть величина, данная для инженера, проектирующаго извѣстную канализацiю, при чемъ при назначенiи ея онъ долженъ сообразоваться не только съ требованiями современнаго судоходства, но долженъ подумать и о будущемъ и, насколько возможно, обезпечить возможность увеличенiя ея.

Высота подпора.

Что касается до высоты подпора, то, очевидно, что она зависитъ отъ высоты фермъ, служащихъ для закрытiя отверстiй плотины, и отъ высоты низкаго горизонта надъ порогомъ флюдбета. Обыкновенно она равняется разности этихъ двухъ величинъ, конечно, въ зависимости отъ выбора той или другой системы затворовъ.

Глубина на порогѣ, считая отъ низкаго горизонта, обыкновенно является напередъ заданной величиной, одинаковой для всей канализацiи, такъ какъ она сообразуется съ среднимъ возвышенiемъ дна рѣки и той судоходной глубиной, которой желаютъ достигнуть.

Переходя къ высотѣ фермъ, служащихъ для закрытiя отверстiй плотинъ, нельзя не указать на постоянное стремленiе придавать имъ все бо́льшую и бо́льшую высоту съ цѣлью увеличенiя разстоянiя между смежными плотинами. По мнѣнiю Lagrené всякая плотина, какъ-бы хорошо она ни была спроектирована, представляетъ собою стѣсненiе для судоходства, а потому лучше построить меньше плотинъ, но съ бо́льшими подпорами, что рацiонально и въ экономическомъ отношенiи. Въ случаѣ низкихъ береговъ, конечно, приходится для защиты ихъ возводить продольныя дамбы, хотя лучше, если возможно, избѣгать этого, такъ какъ тутъ приходится сталкиваться съ интересами прибрежныхъ землевладѣльцевъ. Инженеръ Guillemain разбираетъ этотъ вопросъ нѣсколько подробнѣе: „Часто является вопросъ, пишетъ онъ въ своемъ курсѣ внутреннихъ водяныхъ сообщенiй, чему отдать предпочтенiе, уменьшать-ли число плотинъ, увеличивая ихъ высоту, или-же увеличивать ихъ число, дѣлая бьефы болѣе короткими. Рѣшить этотъ вопросъ, если разсматривать его самостоятельно, довольно трудно, такъ какъ оба эти способа имѣютъ свои выгоды и свои недостатки. Длинные бьефы очень удобны для судоходства, такъ какъ меньше времени тратится на пропускъ судовъ черезъ шлюзы; далѣе, стоимость плотинъ растетъ не въ прямой пропорцiональности ихъ высотамъ; по этимъ двумъ причинамъ выгоднѣе уменьшать число плотинъ, дѣлая ихъ болѣе высокими.

Но, съ другой стороны, чѣмъ выше плотина, тѣмъ труднѣе маневры съ нею и тѣмъ серьезнѣе послѣдствія въ случаѣ какихъ либо несчастныхъ случаевъ. Не слѣдуетъ упускать изъ вида и того обстоятельства, что не всегда проходитъ безнаказанно измѣненіе режима рѣки; чѣмъ больше высоты подпоровъ, тѣмъ сильнѣе происходятъ отложенія наносовъ, влекомыхъ рѣкой, результатомъ чего является образованіе новыхъ перекатовъ, съ которыми приходится бороться путемъ землечерпанія, если только желаютъ сохранить въ бьефѣ прежнюю глубину.

Мы думаемъ поэтому, что на судоходномъ пути съ оживленнымъ движеніемъ, если только нѣтъ недостатка въ личномъ составѣ служащихъ при маневрахъ, и часто производится землечерпаніе, выгоднѣе увеличивать высоту подпоровъ. На рѣкахъ-же съ среднимъ движеніемъ, гдѣ большіе расходы на личный составъ служащихъ и на энергичныя мѣры по упорядоченію пути не соотвѣтствуютъ самому грузовому движенію, лучше уже примириться съ бо́льшей потерей времени, чтобы только избѣжать всѣхъ тѣхъ опасностей, которыя сопряжены съ большими подпорами".

Такимъ образомъ высота плотины является для инженера, проектирующаго канализацію, элементомъ перемѣннымъ, конечно, въ извѣстныхъ предѣлахъ.

Глубина воды на королѣ шлюза.

Глубина воды на низовомъ королѣ шлюза, какъ мы указывали выше, должна быть не менѣе минимальной судоходной глубины, конечно считая отъ подпорнаго горизонта. Послѣднее условіе вынуждаетъ иногда располагать короли шлюза на разныхъ уровняхъ, устраивая стѣнку паденія. Располагать верхній король значительно ниже дна рѣки, чтобы избѣжать только стѣнки паденія, часто нежелательно по нѣсколькимъ причинамъ, а именно при этомъ безполезно увеличивается объемъ кладки и высота воротъ въ верхней головѣ, затрудняется устройство ея фундамента, и кромѣ того послѣ каждаго пáводка можно ожидать занесенія пескомъ флюдбета верхней головы. Стѣнку паденія обыкновенно устраиваютъ тогда, когда разность уровней верхняго и нижняго королей по расчету получается болѣе одного метра. Если эта разность менѣе одного метра, лучше оба короля расположить на одномъ уровнѣ нижняго короля.

Камерный шлюзъ при плотинѣ во время высокихъ водъ обыкновенно бываетъ открытъ, служа какъ-бы дополнительнымъ отверстіемъ плотины, и кромѣ того можетъ иногда функціонировать какъ судоходное отверстіе.

Судоходное отверстіе.

Судоходное отверстіе, какъ показываетъ самое его названіе, служитъ для прохода судовъ въ то время, когда рѣка обладаетъ достаточной глубиной въ естественномъ ея состояніи. Флюдбетъ его не долженъ никоимъ образомъ быть выше самыхъ мелкихъ мѣстъ, примыкающихъ къ плотинѣ бьефовъ; въ противномъ случаѣ онъ представлялъ-бы препятствіе для судоходства и суда вынуждены были-бы проходить черезъ шлюзъ даже тогда, когда рѣка судоходна въ естественномъ ея состояніи, не говоря уже о томъ, что такой выступъ въ руслѣ рѣки непремѣнно способствовалъ-бы отложенію наносовъ и постепенному обмелѣнію рѣки около плотины.

Принимая во вниманіе эти соображенія, французскіе инженеры располагали флюдбеты судоходныхъ отверстій на 0,20 метра ниже самыхъ мелкихъ мѣстъ примыкающихъ къ плотинѣ бьефовъ. При такихъ условіяхъ, въ случаяхъ неожиданныхъ поврежденій въ шлюзѣ, для судоходныхъ цѣлей можетъ служить судоходное отверстіе даже и въ періодъ меженняго стоянія воды въ рѣкѣ.

Такъ какъ судоходное отверстіе представляетъ по стоимости наиболѣе дорогую часть плотины, то длину ему слѣдуетъ придавать не болѣе той, какая потребуется какъ по расчету на пропускъ черезъ него меженняго расхода воды безъ образованія выше плотины значительнаго подпора, такъ, и для свободнаго прохода черезъ него судовъ.

Расчитывается на пропускъ меженняго расхода оно потому, что во время устройства плотины, обыкновенно, черезъ него проходитъ весь меженній расходъ, пока строится водосливъ, а кромѣ того оно иногда служитъ для пропуска судовъ и въ меженнее время, какъ объ этомъ уже было говорено выше.

Во время весеннихъ водъ оно вмѣстѣ съ открытымъ водосливомъ, а иногда и шлюзомъ должно пропускать весь расходъ весеннихъ высокихъ водъ безъ образованія выше плотины значительнаго подпора (не болѣе 1 фута), который могъ-бы затруднить взводное судоходство. Посмотримъ теперь, какова должна быть длина судоходнаго отверстія, чтобы не быть стѣснительной для судоходства. Если обратиться къ примѣрамъ французскихъ рѣкъ, то мы увидимъ, что тамъ величина эта колеблется отъ 40 до 55 метровъ въ зависимости отъ интенсивности судоходства. У насъ въ Россіи отверстія эти дѣлаются обыкновенно отъ 15 до 25 саж.

Въ заключеніе о судоходныхъ отверстіяхъ не лишнимъ будетъ сообщить, что они всегда располагаются нормально къ судовому ходу и во время высокихъ водъ въ значительной мѣрѣ способствуютъ удаленію тѣхъ наносовъ, которые успѣваютъ сложиться въ вышележащемъ бьефѣ въ предшествовавшій періодъ, когда плотина была закрыта.

Водосливъ.

При проектированіи разборчатаго водослива, т. е., состоящаго изъ постоянной части, по верхъ которой расположены подвижныя фермы, прежде всего является вопросъ, на какой высотѣ слѣдуетъ помѣстить флюдбетъ постоянной части. Вопросъ этотъ довольно сложный, и то или другое рѣшеніе задачи зависитъ какъ отъ мѣстныхъ условій и режима рѣки въ данномъ мѣстѣ, такъ и отъ длины другихъ отверстій плотины, а также и отъ типа подвижныхъ затворовъ, служащихъ для закрытія водосливнаго отверстія.

Въ гидравлическомъ отношеніи водосливъ долженъ удовлетворять слѣдующимъ условіямъ: 1. Пропускать безъ повышенія подпорнаго горизонта быстро наступающіе паводки. 2. Пропускать вмѣстѣ съ остальными открытыми отверстіями плотины расходъ самыхъ высокихъ весеннихъ водъ безъ образованія выше плотины значительнаго подпора (не болѣе 1 фута). 3. Если судоходное отверстіе закрывается щитами или спицами, водосливъ, будучи открытъ, т. е., когда подвижныя фермы его уложены на флюдбетъ, долженъ пропускать меженній расходъ такъ, чтобы при постепенномъ закрытіи судоходнаго отверстія образующійся подпоръ не слишкомъ затруднялъ маневровъ (долженъ быть не болѣе нѣсколькихъ дециметровъ).

Если судоходное отверстіе закрывается фермами, приводимыми въ движеніе самымъ подпоромъ, какъ это имѣетъ мѣсто для щитовъ Дефонтена, Кранца и др., условіе третье уже непримѣнимо; въ этомъ случаѣ, наоборотъ, ощущается потребность въ начальномъ подпорѣ, который долженъ дать возможность поднять первые щиты; для этой цѣли обыкновенно поднимаютъ выше порогъ постоянной части водослива, но не слѣдуетъ идти слишкомъ далеко въ этомъ направленіи, такъ какъ это можетъ повлечь за собой чрезмѣрное удлиненіе сооруженія для полученія необходимой площади живого сѣченія; лучше порогъ постоянной части водослива располагать на умѣренной высотѣ относительно низкаго меженняго горизонта, а потребный для закрытія судоходнаго отверстія начальный подпоръ производить путемъ закрытія извѣстной части водосливнаго отверстія.

Что касается до длины водослива, то само собой очевидно, что она находится въ прямой зависимости отъ высоты порога постоянной его части, а также и отъ величины судоходнаго отверстія по причинамъ, о которыхъ мы говорили уже выше.

Водосливъ располагается или нормально, или подъ нѣкоторымъ угломъ къ оси судового хода. Вообще уголъ между направленіемъ судоходнаго и водосливнаго отверстія не долженъ превышать 30°, чтобы теченіе не направилось къ нижней головѣ шлюза и не образовало тамъ наносовъ. Подробнѣе мы разберемъ этотъ вопросъ нѣсколько ниже.

Водоспускъ.

Среднее мѣсто между судоходнымъ отверстіемъ и водосливомъ занимаетъ такъ называемый „водоспускъ", или отверстіе съ повышеннымъ сравнительно съ судоходнымъ порогомъ. Назначеніе водоспусковъ заключается главнымъ образомъ въ томъ, что они служатъ дополнительными отверстіями на случай пропуска паводка. Кромѣ того, благодаря тому, что они устраиваются въ сравнительно глубокихъ частяхъ русла, и флюдбетъ ихъ мало возвышается надъ дномъ рѣки, живое сѣченіе послѣдней меньше стѣсняется плотиной въ весеннее время, когда всѣ отверстія открыты, и подпоръ, производимый плотиной, становится менѣе ощутительнымъ для взводнаго судоходства. Благодаря небольшой высотѣ фермъ, служащихъ для закрытія водоспускного отверстія, маневры съ ними очень легки и удобны, и вообще можно сказать, что устройство водоспусковъ при плотинахъ очень полезно и раціонально.

Водоспуски иногда могутъ устраиваться при плотинѣ взамѣнъ водосливовъ, и съ перваго взгляда они могутъ казаться даже удобнѣе этихъ послѣднихъ, такъ какъ могутъ дать, будучи одинаковой съ ними длины, бóльшее пропускное отверстіе и менѣе измѣняютъ режимъ рѣки, когда она въ естественномъ своемъ состоянiи, но не слѣдуетъ забывать, что какъ устройство, такъ и ремонтъ водоспусковъ обходятся гораздо дороже водосливовъ.

Вообще нельзя не замѣтить, что при проектированiи канализацiи рѣки разобраться между различными возможными рѣшенiями, заставляя варьировать высоты пороговъ, длины отверстiй, типы затворовъ и затраты на ихъ устройство, чрезвычайно трудно, и требуется большая опытность въ этомъ дѣлѣ, чтобы рѣшить задачу наилучшимъ образомъ.

Опредѣленiе вида кривой подпора. При разсмотрѣнiи вопроса о выборѣ мѣста для плотины мы дѣлали предположенiе, что подпоръ выше плотины распространяется по горизонтальной прямой, проходящей черезъ гребень плотины; предположенiе это, выгодное для судоходства, можетъ имѣть крайне печальныя послѣдствiя для прибрежныхъ жителей, а потому слѣдуетъ вопросъ о видѣ дѣйствительной кривой подпора разсмотрѣть возможно подробнѣе.

По мнѣнiю Lagrené самой рацiональной формулой для опредѣленiя кривой подпора слѣдуетъ считать формулу Dupuit, выведенную имъ изъ уравненiя установившагося неравномѣрнаго движенiя:

$$dz = \frac{udu}{g} + \frac{\chi}{\Omega}(\alpha u + \beta u^2)\ ds,$$

въ которомъ буквы имѣютъ слѣдующiя значенiя:

z — паденiе потока между двумя живыми сѣченiями, горизонтальное разстоянiе между которыми равно s.

u — средняя скорость въ одномъ живомъ сѣченiи, нормальномъ къ теченiю и имѣющемъ подводный периметръ χ и подводную площадь Ω.

α — коэффицiентъ, равный 0,0000243.

β — коэффицiентъ, равный 0,000366.

$g = 9{,}81$.

(Dupuit. Etudes sur les eaux courants, chap. 2).

Въ дальнѣйшихъ выводахъ для упрощенія расчета вмѣсто дѣйствительнаго русла принятъ прямоугольнаго сѣченія каналъ той-же ширины и того-же уклона, представляющій тѣ же сопротивленія.

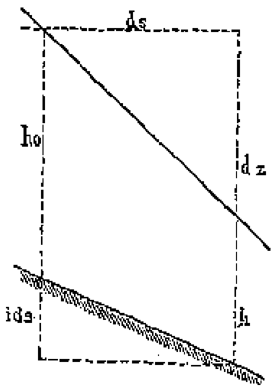
Примемъ слѣдующія обозначенія:

i — абсолютная величина тангенса угла наклоненія дна къ горизонту.

q — расходъ воды на одинъ погонный метръ ширины потока.

L — половина ширины потока.

h — перемѣнная высота воды надъ дномъ потока.



Чер. 1.

Между этими величинами, какъ видно изъ черт. 1, существуетъ слѣдующее соотношеніе: $h_0 = dz + h - ids$, откуда $dz = h_0 - h + ids = dh + ids$.

Сверхъ того по опредѣленію имѣемъ:

$$\frac{\chi}{\Omega} = \frac{L+h}{Lh} \quad \text{и} \quad u = \frac{q}{h}$$

откуда $udu = -\frac{q^2}{h^3} dh$

Подставляя эти величины въ общее уравненіе движенія, получимъ:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{ih^3 - \frac{L+h}{L}(\alpha qh + \beta q^2)}{h^3 - \frac{q^2}{g}}$$

Если приходится имѣть дѣло съ потокомъ весьма широкимъ сравнительно съ глубиной, то можно пренебречь отношеніемъ $\frac{h}{L}$ сравнительно съ 1 и α сравнительно съ β; тогда уравненіе приметъ видъ

$$\frac{dh}{ds} = \frac{ih^3 - \beta q^2}{h^3 - \frac{q^2}{g}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Обозначимъ теперь черезъ H постоянную глубину, а черезъ U среднюю скорость, соотвѣтствующія равномѣрному режиму въ прямоугольнаго сѣченія фиктивномъ каналѣ, имѣющемъ ту же ширину $2L$ и тотъже уклонъ i, какъ и разсматриваемое русло при расходѣ q на одинъ погонный метръ ширины потока.

Имѣемъ тогда

$$\frac{\Omega}{\chi} = \alpha U + \beta U^2$$

Пренебрегая, какъ сказано выше, отношеніемъ $\frac{H}{L}$ и α, приведемъ равенство къ виду:

$$Hi = \beta U^2$$

По опредѣленію

$$q = UH, \text{ или } U^2 = \frac{q^2}{H^2}; \text{ и } \beta = \frac{H^3 i}{q^2}.$$

Если эти значенія q и β подставить въ равенство (1), то получимъ:

$$\frac{dh}{ds} = i \cdot \frac{\frac{h^3}{H^3} - 1}{\frac{h^3}{H^3} - \frac{U^2}{gH}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2);$$

$\frac{dh}{ds}$ мало отличается отъ угла, составляемаго касательной къ кривой подпора съ линіей поверхностнаго уклона при равномѣрномъ режимѣ, а $\frac{dz}{ds}$ представляетъ уголъ той-же касательной съ горизонтомъ.

Такъ какъ мы изслѣдуемъ тотъ подпоръ, который производитъ плотина, то слѣдуетъ предположить, что h имѣетъ значенія только бо́льшія и, въ крайнемъ случаѣ, равныя H.

Числитель $\frac{h^3}{H^3} - 1$ поэтому положителенъ.

Знаменатель также положителенъ, такъ какъ $\frac{U^2}{gH} < 1$; въ самомъ дѣлѣ

$$Hi = \beta U^2; \quad \frac{U^2}{gH} = \frac{i}{g\beta} = \frac{i}{9{,}81 . 0{,}000336} = \frac{i}{0{,}0036}$$

Но на всѣхъ водныхъ путяхъ, гдѣ имѣется судоходство, i меньше 0,0036.

Такимъ образомъ величина $\frac{dh}{ds}$ имѣетъ тотъ-же знакъ, что и i, такъ что кривая подпора обращена своей выпуклостью къ линіи естественнаго поверхностнаго уклона.

Выраженіе (2) показываетъ, что, когда h очень немногимъ больше H, $\frac{dh}{ds}$ — очень незначительная величина, т. е. кривая подпора приближается къ касательной къ поверхностному уклону, но точка касанія можетъ быть только въ безконечности, такъ какъ выраженіе (2) послѣ интегрированія будетъ вида $h = f(s)$, т. е. глубина должна измѣняться въ зависимости отъ s, между тѣмъ какъ выше точки касанія мы должны имѣть постоянно $h = H$.

Если далѣе предположить, что h увеличивается непрерывно вмѣстѣ съ s, которое будемъ отсчитывать сверху внизъ по оси потока, то увидимъ, что для $h = \infty$ отношеніе $\frac{dh}{ds} = i$.

Переходя къ отношенію $\frac{dz}{ds} = -\frac{dh}{ds} + i$, можемъ, замѣтить, что s увеличивается вмѣстѣ съ h, и при $h = \infty$ получимъ $s = \infty$, а касательная къ кривой горизонтальна.

Итакъ для потока, опредѣляемаго уклономъ i глубиною H и среднею скоростью U, соотвѣтствующими равномѣрному режиму, существуетъ только одна кривая подпора, имѣющая ассимптотою съ верховой стороны свободную поверхность потока при равномѣрномъ режимѣ, а съ низовой горизонтальную плоскость.

Другими словами, отрѣзокъ кривой, изображающій подпоръ, производимый плотиною высотою, напримѣръ, въ 1 метръ, составляетъ часть кривой подпора, производимаго плотиной въ 1,50 мет. высоты.

Возвращаясь къ интегралу уравненія

$$ids = \frac{\frac{h^3}{H^3} - \frac{U^2}{gH}}{\frac{h^3}{H^3} - 1} dh,$$

замѣтимъ, что $\frac{U^2}{gH}$ или $\frac{i}{g\beta}$ есть весьма незначительная правильная дробь, между тѣмъ какъ $\frac{h}{H}$ и тѣмъ болѣе $\frac{h^3}{H^3}$ значительно больше единицы. Для упрощенія можно пренебречь поэтому величиной $\frac{U^2}{gH}$.

Замѣнимъ далѣе h черезъ $y + H$, гдѣ y представляетъ вертикальную ординату подпора, считаемую отъ линіи поверхностнаго уклона при равномѣрномъ режимѣ. Уравненіе приметъ видъ:

$$ids = \frac{(y+H)^3}{(y+H)^3 - H^3} dy.$$

Если обозначить

$\frac{y+H}{H} = z$, откуда $dy = Hdz$, то получимъ:

$$\frac{ids}{H} = \frac{z^3}{z^3 - 1} dz = (1 + z^{-3} + z^{-6} + \ldots\ldots) dz.$$

Интегрируемъ это уравненіе; получимъ:

$$\frac{is}{H} + C = \frac{y+H}{H} - \frac{1}{2}\left(\frac{H}{y+H}\right)^2 - \frac{1}{5}\left(\frac{H}{y+H}\right)^5 - \ldots,$$

уравненіе, данное впервые генеральнымъ инспекторомъ Dupuit.

Для опредѣленія постоянной C предположимъ, что начало координатъ находится на самой плотинѣ въ точкѣ пересѣченія ея линіей поверхностнаго уклона, и обозначимъ черезъ Y высоту подпора у самой плотины, тогда

$$\text{при } y = Y \quad S = 0,$$

откуда $C = -\frac{Y+H}{H} - \frac{1}{2}\left(\frac{H}{Y+H}\right)^2 - \frac{1}{5}\left(\frac{H}{Y+H}\right)^5 - \ldots$

Ограничиваясь двумя первыми членами ряда и измѣняя знакъ при s такъ, чтобы оно было положительнымъ въ направленіи вверхъ по теченію отъ плотины, получимъ уравненіе:

$$Si = (Y - y)\left[1 + \frac{H^3}{2} \cdot \frac{Y + y + 2H}{(Y+H)^2 \cdot (y+H)^2}\right] \ldots\ldots (3)$$

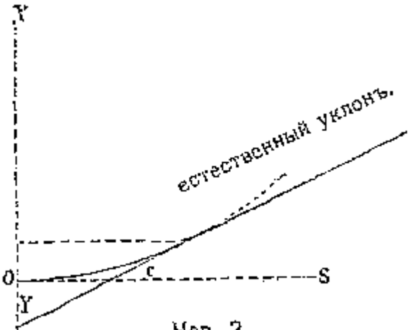
При помощи этого уравненія можно найти сколько угодно точекъ кривой подпора; для этого нужно только задаваться различными значеніями y меньшими Y и находить для нихъ соотвѣтственныя S. Кромѣ того изъ него видно, что при i и Y постоянныхъ S увеличивается вмѣстѣ съ H; другими словами, съ увеличеніемъ глубины потока подпоръ распространяется на бóльшее протяженіе, хотя бы уклонъ и высота подпора и оставались постоянными*).

Парабола съ вертикальной осью, предложенная Поаре.

Генеральный инспекторъ Poirée пришелъ къ заключенію, что кривую подпора можно считать за параболу 2-го порядка съ вертикальною осью, при чемъ вершина ея совпадаетъ съ вершиной плотины, а линія поверхностнаго уклона касательна къ этой параболѣ.

*) Для упрощенія численныхъ расчетовъ Dupuit составилъ таблицы, при помощи которыхъ очень легко рѣшаются различныя задачи, касающіяся подпора. Въ концѣ первой части настоящаго труда онѣ помѣщены съ краткимъ къ нимъ руководствомъ.

Уравненіе ея, если сохранить прежнія обозначенія, будетъ вида $S^2 = 2py$, при чемъ слѣдуетъ замѣтить, что въ настоящемъ случаѣ y обозначаетъ высоту подпора надъ горизонтальной линіей, служащей осью S, а не надъ линіей поверхностнаго уклона, какъ это было выше.



Чер. 2.

Уравненіе линіи поверхностнаго уклона при равномѣрномъ режимѣ будетъ:

$$y = iS - Y.$$

Для точки касанія этой прямой съ параболой имѣемъ слѣдующія три уравненія:

$$S^2 = 2py, \; y = iS - Y, \; \frac{S}{p} = i.$$

По исключеніи S и Y получаемъ соотношеніе $p = \frac{2Y}{i^2}$, а потому искомое уравненіе параболы будетъ:

$$S^2 = \frac{4Y}{i^2}\, y\,.$$

Абсцисса точки касанія прямой поверхностнаго уклона съ параболой, т. е. разстояніе, на которое простирается дѣйствіе подпора, равно $\frac{2Y}{i}$, такъ что, если принять кривую подпора за параболу, выходитъ, что подпоръ распространяется на вдвое бóльшее протяженіе, чѣмъ въ предположеніи гидростатическаго состоянія подпертой плотиной воды.

Если-бы мы представили уравненіе параболы въ болѣе общемъ видѣ, обозначивъ ея порядокъ буквой n, т. е. взяли-бы уравненіе $S^n = 2py$, то мы всегда бы имѣли для точки касанія ея съ прямой поверхностнаго уклона слѣдующія три уравненія:

$$S^n = 2py, \quad y = iS - Y, \; \frac{dy}{dS} = \frac{nS^{n-1}}{2p} = i,$$

которыя и послужили-бы для опредѣленія координатъ этой точки и величины p.

Абсцисса точки касанія равна $\frac{nY}{(n-1)\,i}$. Такимъ образомъ, если-бы мы приняли кривую подпора за параболу 3-го порядка, то нашли-бы, что подпоръ долженъ распространиться на протяженіе $\frac{3Y}{2i}$, среднее между $\frac{Y}{i}$ — для гидростатическаго подпора и $\frac{2Y}{i}$ — для подпора по параболѣ 2-го порядка.

Введемъ въ уравненіе $S^2 = \frac{4Y}{i^2}\,y$ для наглядности высоту подпора y' надъ линіей поверхностнаго уклона.

Очевидно, что

$$y' + Si = y + Y, \text{ откуда } y = y' + Si - Y$$

Подставляя въ уравненіе $S^2 = \frac{4Y}{i^2}\,y$ вмѣсто y найденное выраженіе, получимъ:

$$y' = Y - Si + \frac{S^2 i^2}{4Y}.$$

Таково уравненіе, предложенное Poirée для приблизительнаго опредѣленія высоты подпора y' надъ линіей поверхностнаго уклона.

Парабола съ горизонтальной осью, предложенная Funck'омъ.

Для той-же цѣли Funck предложилъ уравненіе

$$y' = 2Y - iS + \sqrt{Y\left(Y - \frac{iS}{2}\right)}$$

въ которомъ буквы имѣютъ тоже значеніе, что и въ уравненіи Poirée. Чтобы изслѣдовать кривую, представляемую этимъ уравненіемъ, слѣдуетъ въ него ввести ординату y, считаемую отъ горизонтальной линіи, служащей осью S'овъ. (чер. 3).

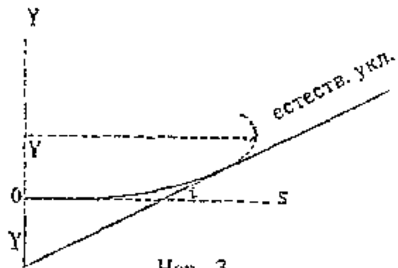
Имѣемъ, какъ и выше, $y' + Si = y + Y$, откуда $y' = y + Y - Si$.

Такимъ образомъ уравненіе Funck'а приметъ видъ

$$(y - Y)^2 = Y\left(Y - \frac{iS}{2}\right)$$

Оно представляетъ параболу съ горизонтальной осью, расположенною на Y выше прямой гидростатическаго подпора. Чтобы найти ея вершину примемъ $y = Y$, тогда получимъ $S = \frac{2Y}{i}$.

Абсцисса точки касанія равна $\frac{3Y}{2i}$ т. е. одинакова съ тою, которую мы получили для кривой подпора въ видѣ параболы 3-го порядка. Послѣдняя все-таки ближе къ истинѣ, такъ какъ въ ней радіусъ кривизны постепенно увеличивается по мѣрѣ удаленія отъ плотины, что должно быть въ истинной кривой подпора, въ параболѣ-же Funck'а мы встрѣчаемся съ обратнымъ явленіемъ.



Чер. 3.

Гипербола 9-го порядка, предложенная Saint-Guilhem'омъ.

Заслуживаетъ вниманія еще уравненіе, предложенное Saint-Guilhem'омъ

$$y = Y\sqrt[3]{\frac{1}{1 + \frac{4}{g}Y\left(\frac{iS}{Y}\right)^6} + \left(\frac{iS}{Y}\right)^3}$$

. Въ этомъ послѣднемъ осью S служитъ горизонтальная прямая, расположенная на Y ниже линіи гидростатическаго подпора. Ось y'овъ таже, что и въ вышеприведенныхъ формулахъ.

Чтобы сдѣлать уравненіе Saint-Guilhem'a болѣе удобнымъ для практическихъ цѣлей, введемъ въ него y'—высоту подпора надъ линіей поверхностнаго уклона.

Очевидно, что $y = y' + iS$, а потому послѣ подстановки уравненіе приметъ видъ:

$$y' = Y\sqrt[3]{\frac{1}{1+\frac{4}{g}Y\left(\frac{iS}{Y}\right)^6} + \left(\frac{iS}{Y}\right)^3} - iS.$$

Къ гиперболѣ 9-го порядка, уравненіе которой мы только что разсматривали, Saint-Guilhem пришелъ, принявъ слѣдующія положенія: 1. что кривая подпора у плотины должна быть почти горизонтальна, 2. что она должна ассимптотически приближаться къ линіи поверхностнаго уклона, 3. что уклонъ потока одинаковъ въ предѣлахъ распространенія подпора.

При такихъ предположеніяхъ и указанныхъ выше координатныхъ осяхъ уравненіе кривой должно быть вида:

$$\left(\frac{y}{Y}\right)^m - \left(\frac{Si}{Y}\right)^m = \frac{1}{1+a\left(\frac{Si}{Y}\right)^n};$$

постоянныя m, n и a онъ опредѣлилъ на основаніи опытовъ.

Изъ этого уравненія видно, что для $S = O$, $y = Y$ и $\frac{dy}{dx} = O$. Кромѣ того съ увеличеніемъ S членъ $\frac{1}{1+a\left(\frac{Si}{Y}\right)^n}$ стремится къ нулю, а y въ тоже время приближается къ Si, т. е. къ ординатѣ прямой поверхностнаго уклона, служащей ассимиптотой къ кривой.

Сравненіе вышеприведенныхъ кривыхъ.

Изъ трехъ кривыхъ, изслѣдованіемъ которыхъ мы только что занимались, кривая Poirée является самою простою и удобною, кривая Saint-Guilhem'a наиболѣе раціональною, при чемъ она даетъ лучшіе результаты для бо́льшихъ значеній S, что-же касается до кривой Funck'а, то выше уже были указаны ея важные недостатки.

Самое поверхностное изслѣдованіе уже показываетъ, что всѣ эти кривыя не представляютъ дѣйствительной кривой подпора, такъ какъ въ этой послѣдней y' и Y должны входить совершенно на равныхъ правахъ, и точка S должна быть одной изъ точекъ кривой, обладающей тѣми-же свойствами, что и всѣ другія.

Кромѣ того въ формулахъ Poirée и Saint-Guilhem'а неправильно принято, что въ точкѣ $S = O$ касательная—горизонтальна. Двѣ изъ формулъ, а именно Poirée и Funck'а даютъ для кривой подпора конечныя вѣтви кривыхъ, что также не вполнѣ согласно съ истиной.

Наконецъ всѣ онѣ имѣютъ одинъ общій недостатокъ, а именно въ нихъ не введена зависимость подпора отъ H — глубины при равномѣрномъ режимѣ или вѣрнѣе отъ расхода, важное вліяніе котораго очевидно a priori.

Dupuit примѣнилъ эти три эмпирическія формулы къ одному и тому же случаю и полученные результаты сравнилъ съ тѣми, которые онъ получилъ изъ формулы установившагося неравномѣрнаго движенія.

Онъ принялъ $Y = 0{,}40$ мет., $H = 6$ мет. $i = 0{,}0002$. Въ нижеслѣдуюшей таблицѣ показаны результаты этого сравненія.

	Высоты подпоровъ			
	на раз. 0 кил.	на раз. 1 кил.	на раз. 2 кил.	на раз. 3 кил.
по формулѣ Funck'а . . .	0,40	0,25	0,12	0,00
" Saint-Guilhem'а	0,40	0,21	0,09	0,02
" Poirée	0,40	0,22	0,10	0,02
" устан. неравн. движ. . . .	0,40	0,37	0,34	0,30

Взятый примѣръ, правда, не относится къ разряду тѣхъ, съ которыми приходится встрѣчаться на практикѣ при устройствѣ шлюзовыхъ плотинъ, такъ какъ H въ такихъ случаяхъ обыкновенно бываетъ значительно меньше, но онъ за то подходитъ къ глухимъ плотинамъ, показывая, какъ сильно вліяетъ плотина вслѣдствіе стѣсненія высокихъ водъ.

Изъ таблицы мы видимъ, что на раэстоянія 3 кил. отъ плотины высота подпора по первымъ 3 формуламъ ничтожна, между тѣмъ какъ по формулѣ установившагося неравномѣрнаго движенія она равна 0,30 метра (а на разстояніи 7 килом. она еще равна 0,20 метра). Подобная ошибка можетъ имѣть послѣдствіемъ громадныя бѣдствія для прибрежныхъ жителей, почему Dupuit и даетъ совѣтъ въ своемъ трудѣ „Recherches sur le mouvement des eaux" никогда не пользоваться приведенными выше приблизительными формулами.

Серьезностью этого вопроса объясняется и то обстоятельство, что мы удѣлили разсмотрѣнію его нѣсколько страницъ настоящаго вообще довольно краткаго труда.

Глухія водосливныя плотины.

Прежде чѣмъ перейти къ разбору различныхъ системъ разборчатыхъ плотинъ, мы считаемъ нужнымъ остановиться нѣсколько на вопросѣ о глухихъ водосливныхъ плотинахъ. Эти послѣднія въ настоящее время встрѣчаются на судоходныхъ рѣкахъ только въ исключительныхъ случаяхъ, но изученіе ихъ интересно далеко не съ одной только теоретической точки зрѣнія: при разборѣ ихъ мы получаемъ выводы и указанія, которые часто полностью примѣнимы и къ разборчатымъ плотинамъ.

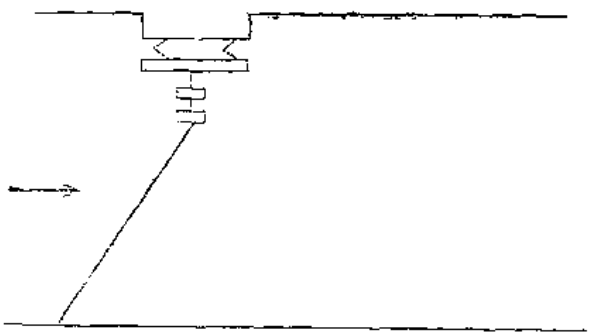
Направленіе, которое слѣдуетъ придавать плотинѣ въ планѣ.

Свое изслѣдованіе мы начнемъ съ вопроса о томъ направленіи, которое слѣдуетъ придавать плотинѣ въ планѣ, т. е. располагать-ли плотину нормально къ теченію, или наклонно, или въ видѣ двухъ прямолинейныхъ вѣтвей, сходящихся подъ угломъ противъ теченія.

Генеральный инспекторъ Mary произвелъ для выясненія этого вопроса опыты на каналѣ прямоугольнаго сѣченія съ расходомъ въ 133 литра въ секунду. Онъ расположилъ въ немъ 4 водослива, одинъ нормально къ теченію и 3 другихъ наклонно, при чемъ длины ихъ были равны двойной, тройной и четыре раза взятой нормальной ширинѣ русла.

Наблюденія надъ высотами протекавшихъ черезъ водосливы массъ воды наглядно показали преимущества наклоннаго расположенія водослива, чего и слѣдовало ожидать, исходя изъ формулы гидравлики, въ которой расходъ водослива прямо пропорціоналенъ его длинѣ.

Но не слѣдуетъ забывать, что вышеуказанныя преимущества нужно понимать только въ смыслѣ болѣе свободнаго пропуска паводковъ и высокихъ водъ, между тѣмъ какъ есть много другихъ весьма важныхъ

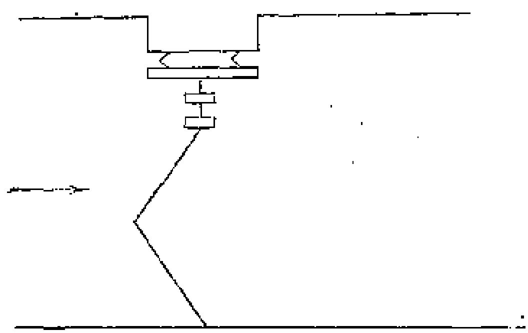


Чер. 4.

явленій, которыя тѣсно связаны съ пропускомъ воды черезъ водосливъ, и которыя иногда приходится имѣть на первомъ планѣ при проектированіи плотины (чер. 4). Постараемся выяснить, отчего происходятъ вышеупомянутыя явленія, и какъ бороться противъ нихъ.

Разсмотримъ сначала плотину, расположенную въ планѣ по прямой линіи, примыкающей подъ косымъ угломъ къ шлюзу, расположенному у противоположнаго берега. Опытъ показалъ, что несмотря на наклонное къ оси теченія положеніе плотины струи весеннихъ водъ и значительныхъ паводковъ проходятъ черезъ нее параллельно оси рѣки; напротивъ въ меженнее время, когда скорость выше плотины ничтожна, струи переливаются черезъ гребень плотины почти нормально къ его направленію. Въ періодъ промежуточный между высокимъ и меженнимъ горизонтомъ струи будутъ проходить черезъ плотину по направленію среднему между направленіемъ скорости выше плотины и скорости нормальной къ плотинѣ.

Этотъ послѣдній періодъ обыкновенно бываетъ самымъ неблагопріятнымъ для плотины, такъ какъ благодаря наклонному положенію ея относительно оси теченія струи отбрасываются къ берегу, размываютъ его и образуютъ въ рѣкѣ извилистость русла, при чемъ ниже плотины происходятъ отложенія наносовъ. Въ



Чер. 5.

меженній періодъ явленіе это обнаруживается не въ такой рѣзкой формѣ благодаря незначительности расхода.

Чтобы не допустить почти неизбѣжнаго разрушенія берега, плотину устраиваютъ иногда въ видѣ двухъ прямыхъ вѣтвей, сходящихся подъ угломъ противъ теченія (чер. 5). Само собой разумѣется, что въ періодъ меженнихъ и среднихъ водъ ниже плотины по направленію бисектрисы угла, если стороны его равны, образуется подпоръ воды, который бываетъ тѣмъ значительнѣе, чѣмъ острѣе уголъ.

Результатомъ этого подпора является теченіе съ болѣе или менѣе значительной скоростью, дающее себя чувствовать на довольно большое разстояніе. Если рѣка ниже плотины суживается, что бываетъ довольно часто, то образуется часто обратное теченіе, которое направляется вдоль обоихъ береговъ и можетъ сдѣлать стѣснительнымъ выходъ изъ шлюза, а также и подходъ къ нему съ низовой стороны.

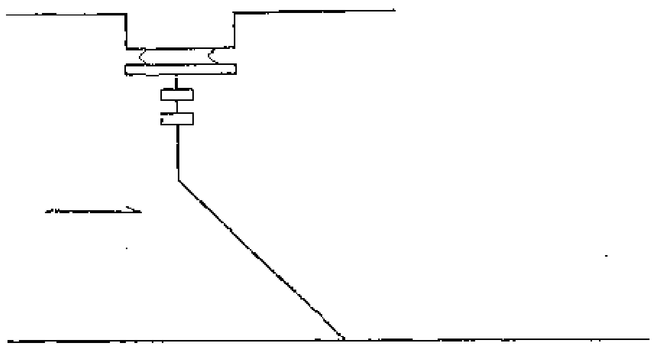
Обратныхъ теченій не слѣдуетъ допускать не только потому, что они стѣсняютъ движеніе судовъ, но кромѣ того, по линіи, отдѣляющей прямое теченіе отъ обратнаго, образуется тиховодъ, сильно способствующій отложенію наносовъ.

Если шлюзъ нѣсколько отодвинуть отъ берега, устроивъ для сообщенія съ этимъ послѣднимъ стѣнку, примыкающую къ его верхней головѣ, то обратное теченіе, двигаясь вдоль берега, заходитъ за шлюзъ, гдѣ и теряется, не встрѣтивъ на своемъ пути выходящихъ изъ шлюза судовъ.

Весьма хорошихъ результатовъ можно достигнуть продолженіемъ боковой стѣнки шлюза на довольно значительное разстояніе внизъ по теченію: съ одной сторонѣ она служила бы въ качествѣ струенаправляющей дамбы, а съ другой стороны вполнѣ прикрывала-бы выходъ судовъ изъ шлюза.

Наиболѣе удачныхъ результатовъ удалось достигнуть на рѣкѣ Lot, гдѣ плотины состояли изъ двухъ неравныхъ вѣтвей: болѣе короткая вѣтвь примыкала къ шлюзу нормально къ его стѣнѣ (въ тоже время и къ теченію), болѣе длинная направлена наклонно къ теченію вплоть до противоположнаго берега, при чемъ уголъ между вѣтвями былъ взятъ въ 135° (чер. 6). Длина нормальной вѣтви колебалась между одной четвертью и половиной наклонной вѣтви; въ ней обыкновенно устраивались судоходныя отверстія.

Когда уголъ, составляемый плотиной съ берегомъ, очень острый, часть ея, ближайшая къ берегу, плохо функціонируетъ. Чтобы устранить этотъ недо-



Чер. 6.

статокъ, прямую часть плотины не доводятъ до самаго берега, а сопрягаютъ конецъ ея съ берегомъ посредствомъ небольшой вогнутой дуги.

Водосливная плотина функціонируетъ, конечно, различно при различныхъ состояніяхъ рѣки, а потому и слѣдуетъ разсмотрѣть каждый случай отдѣльно.

Расходъ водослива въ періодъ меженняго состоянія рѣки.

Начнемъ съ меженняго состоянія рѣки, когда гребень водослива выше горизонта воды ниже плотины, при чемъ предположимъ, что плотина расположена нормально къ оси потока.

По Bresse'y (cours d'Hydraulique) и по Darcy et Bazin'y (Recherches hydrauliques) расходъ въ секунду на одинъ погонный метръ водослива, сдѣланнаго въ тонкой стѣнкѣ, равенъ

$$q = mz\sqrt{2gz},$$

гдѣ m представляетъ коэффиціентъ равный 0,47, когда водосливъ имѣетъ настолько большую длину, что боковыя сжатія не оказываютъ замѣтнаго вліянія на расходъ, и равный 0,424, когда водосливъ небольшой длины, и напоръ, производимый плотиной, незначителенъ. Для приблизительныхъ расчетовъ возьмемъ среднее значеніе для $m = 0{,}45$, тогда формула расхода будетъ

$$q = 2z\sqrt{z};$$

z представляетъ разность высотъ гребня водослива и горизонта воды на разстояніи нѣсколькихъ метровъ выше плотины, гдѣ скорость очень незначительна. Если, наоборотъ, она довольно ощутительна, формулу расхода слѣдуетъ измѣнить, подставивъ въ ней вмѣсто z величину $z + \frac{u^2}{2g}$, гдѣ u — средняя скорость на разстояніи нѣсколькихъ метровъ выше плотины, равная $\frac{Q}{(H+z)L}$. Буквы здѣсь имѣютъ слѣдующія значенія:

Q — расходъ рѣки въ секунду.

H — высота плотины надъ естественнымъ русломъ.

L — ширина рѣки при подпорномъ горизонтѣ.

Такимъ образомъ формула расхода приметъ видъ

$$q = 2\left(z + \frac{u^2}{2g}\right)\sqrt{z + \frac{u^2}{2g}} \text{ *)}.$$

Boileau и Darcy и Bazin на основаніи своихъ опытовъ пришли къ заключенію, что въ случаѣ незатопленнаго водослива во всю ширину рѣки, имѣющаго съ низовой стороны лицевую стѣнку вертикальную, воздухъ, заключающійся подъ вытекающей волной, находится подъ

*) Ниже мы увидимъ, что формула эта не можетъ считаться правильною, и что лучше пользоваться другою, хотя и болѣе сложною, но за то болѣе точной.

давленіемъ ниже атмосфернаго, и вода съ низовой стороны у самой плотины поднимается на нѣкоторую высоту, которая возрастаетъ съ увеличеніемъ скорости протеканія воды черезъ водосливъ.

Поднятіе это впрочемъ колеблется, такъ какъ время отъ времени атмосферный воздухъ съ глухимъ шумомъ проникаетъ подъ волну и въ большей или меньшей степени ослабляетъ его, но затѣмъ опять часть воздуха увлекается, и вода снова начинаетъ подниматься.

Въ зависимости отъ только что указаннаго поднятія воды увеличивается и коэффиціентъ m; онъ достигаетъ значенія 0,513 въ случаяхъ, когда вода подъ волной доходитъ до гребня водослива (Darcy et Bazin. Recherches hydrauliques).

Въ водосливахъ, имѣющихъ въ поперечномъ сѣченіи криволинейную или значительно пологую форму, воздухъ, очевидно, не будетъ имѣть доступа подъ вытекающую волну, а потому и явленія, о которыхъ только что шла рѣчь, не будутъ имѣть мѣста.

Если водосливъ составляетъ уголъ α съ нормалью къ оси потока, и средняя скорость на разстояніи нѣсколькихъ метровъ выше плотины очень незначительна, формула расхода на одинъ погонный метръ его гребня та же, что и для водослива, расположеннаго нормально къ оси потока, а именно:

$$q = 2z\sqrt{z}\,.$$

Если скорость выше плотины, равная $\frac{Q}{(H+z)L}$, такова, что ею нельзя пренебречь, то ее можно разложить по двумъ направленіямъ: одна составляющая $u\cos\alpha$ нормальна къ гребню водослива, другая, $u\sin\alpha$, ему параллельна, при чемъ только первая изъ нихъ вліяетъ на расходъ водослива.

Такимъ образомъ плотина, расположенная подъ косымъ угломъ къ оси рѣки, находится въ такихъ-же условіяхъ, какъ и нормальная, съ тою лишь разницей, что за среднюю скорость выше плотины слѣдуетъ считать $u\cos\alpha$.

Выводъ этотъ указываетъ на возможность примѣнить къ этому случаю вышеприведенную формулу расхода, подставивъ въ ней только вмѣсто u величину $u\cos\alpha$. Получимъ:

$$q = 2\left(z + \frac{u^2\cos^2\alpha}{2g}\right)\sqrt{z + \frac{u^2\cos^2\alpha}{2g}}.$$

Опредѣленіе высоты гребня водослива.

При проектированіи каждой водосливной плотины однимъ изъ самыхъ важныхъ вопросовъ является опредѣленіе высоты, на которой слѣдуетъ расположить ея гребень.

Положимъ, что плотина наша расположена въ такомъ мѣстѣ рѣки, гдѣ ширина ея L, а меженній расходъ Q.

На основаніи общихъ соображеній относительно канализаціи данной рѣки можно опредѣлить ту высоту $H + z$, на которой долженъ стоять подпорный горизонтъ надъ дномъ рѣки у плотины, при чемъ неизвѣстными являются какъ H — высота плотины, такъ и z высота подпорнаго горизонта надъ гребнемъ водослива.

Предположимъ, что плотина состоитъ изъ трехъ частей, проекціи которыхъ на ширину рѣки L соотвѣтственно равны a, b и c, при чемъ

a — проекція, соотвѣтствующая ширинѣ шлюза.

b — проекція, соотвѣтствующая нормальной вѣтви водослива.

c — проекція, соотвѣтствующая наклонной подъ угломъ α, при чемъ длина ея по гребню, очевидно, будетъ $\frac{c}{\cos\alpha}$.

Въ меженнее время весь расходъ будетъ проходить черезъ отверстія длиною b и $\frac{c}{\cos\alpha}$, а потому, примѣняя вышеприведенную формулу, имѣемъ:

$$Q = 2b\left(z + \frac{u^2}{2g}\right)\sqrt{z + \frac{u^2}{2g}} + 2\frac{c}{\cos\alpha}\left(z + \frac{u^2\cos^2\alpha}{2g}\right) +$$

$$+ \sqrt{z + \frac{u^2\cos^2\alpha}{2g}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (1),$$

гдѣ

$$u = \frac{Q}{(H + z)L}.$$

Въ уравненіи (1) неизвѣстной является только z.

Чтобы найти его, опредѣлимъ сначала z_1, соотвѣтствующую случаю, когда $u = O$. Уравненіе (1) приметъ тогда видъ:

$$Q = \left(2b + 2\frac{c}{\cos\alpha}\right) z_1^{3/2},$$

откуда

$$z_1 = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{\left(2b + 2\frac{c}{\cos\alpha}\right)^2}}.$$

Дѣйствительная величина z нѣсколько меньше z_1, и мы можемъ легко найти ее изъ уравненія (1) путемъ пробныхъ подстановокъ.

Зная z, можно опредѣлить и ту высоту, на которой слѣдуетъ расположить гребень водослива, такъ какъ отмѣтка подпорнаго горизонта выше плотины извѣстна.

Вышеприведенныя формулы относятся не только къ меженнему состоянію рѣки, но и ко всему періоду, пока горизонтъ нижняго бьефа ниже гребня плотины.

Весьма важнымъ недостаткомъ этихъ формулъ является то обстоятельство, что во всѣхъ ихъ коэффиціентъ m принятъ одинаковый, а именно 0,45, между тѣмъ какъ величина его варьируетъ въ довольно широкихъ предѣлахъ въ зависимости отъ различныхъ условій.

Расходъ незатопленнаго водослива въ тонкой стѣнкѣ по позднѣйшимъ изслѣдованіямъ.

Само собою понятно, что весьма важно въ каждомъ частномъ случаѣ умѣть найти наиболѣе подходящій къ нему по величинѣ коэффиціентъ, а потому считаемъ необходимымъ нѣсколько остановиться на этомъ вопросѣ.

Какъ извѣстно изъ гидравлики, для водослива въ тонкой стѣнкѣ длиною l формула расхода вообще имѣетъ видъ:

$$Q = \frac{2}{3}\, mlh \sqrt{2gh}\ ,$$

гдѣ m—коэффиціентъ сжатія на порогѣ, h—глубина погруженія порога водослива подъ свободною поверхностью воды на нѣкоторомъ разстояніи выше плотины, или такъ называемый „напоръ".

Если имѣются еще боковыя сжатія, то вліяніе ихъ выражается тѣмъ, что изъ дѣйствительной длины водослива l вычитаютъ $0{,}1\,h$ для сжатія съ одного бока и $0{,}2\,h$ для сжатія съ обоихъ боковъ.

Формулу расхода можно представить въ видѣ $Q = clh^{3/2}$, гдѣ $c = \frac{2}{3}\, m \sqrt{2g}$.

На основаніи самыхъ тщательныхъ наблюденій, произведенныхъ Francis'омъ для напоровъ h отъ 3 дюймовъ до 2 фут., коэффиціентъ c можно считать постояннымъ и равнымъ 3,33, откуда коэффиціентъ сжатія m равенъ.

$$m = \frac{3{,}33}{{}^{2}\!/_{3} \cdot 8{,}025} = 0{,}622$$

Когда потокъ, подходящій къ водосливу, имѣетъ нѣкоторую среднюю скорость v_o, расходъ водослива увеличивается, такъ какъ къ напору H, равному глубинѣ погруженія порога его подъ свободной поверхностью воды выше плотины, прибавляется еще напоръ, соотвѣтствующій средней скорости v_o, равный $\frac{v_o^2}{2g}$; обозначимъ его черезъ h_o. Тогда формула расхода будетъ

$$Q = ml \int_{h_o}^{H+h_o} \sqrt{2gh}\, dh = \frac{2}{3}\, ml \sqrt{2g}\ \left\{(H+h_o)^{3/2} - h_o^{3/2}\right\} .$$

Послѣднее выраженіе можно привести къ виду $Q = clH'^{3/2}$, если положить $\frac{2}{3}\, m\sqrt{2g} = c$ и $H' = \left\{(H+h_o)^{3/2} - h_o^{2/3}\right\}$.

Если извѣстна не средняя скорость потока v_o, а скорость v на его поверхности, то обыкновенно принимаютъ среднюю скорость равною 0,8 отъ скорости на поверхности, такъ что тогда $h_o = \frac{(0{,}8v)^2}{2g}$.

Чтобы убѣдиться вполнѣ въ томъ, что формула Francis'a или вѣрнѣе величина коэффиціента c для напоровъ h меньшихъ 3 дюймовъ даетъ результаты менѣе удовлетворительные, въ 1885 году Tudsbery и Brightmore произвели слѣдующій опытъ: въ одномъ и томъ-же каналѣ они расположили два водослива на нѣкоторомъ разстояніи другъ отъ друга, при чемъ длину одного взяли въ 8 футъ, а другого въ 17,02 фута. Производя одновременныя наблюденія при различныхъ напорахъ надъ ихъ порогами, они получили слѣдующіе результаты:

Водосливъ длиною 8 футъ.		Водосливъ длиною 17,02 фута.	
Напоръ въ дюймахъ.	Расходъ въ куб. фут. въ секунду, полученный по формулѣ Francis'a.	Напоръ въ дюймахъ.	Расходъ въ куб. фут. въ секунду, полученный по формулѣ Francis'a.
1,36	1,01	0,77	0,92
3,45	4,09	2,00	3,86
5,12	7,38	3,03	7,27
6,46	10,36	3,82	10,20
6,99	11,68	4,15	11,62

Разсматривая полученные расходы, мы видимъ, что разница между ними при напорахъ больше 3 дюймовъ едва доходитъ до $1^1/_2\%$, между тѣмъ какъ при напорахъ меньше 3 дюймовъ доходитъ до 9%. (The Principles of Waterworks Engineering by Tudsbery and Brightomore p. 75).

Для водосливовъ, въ которыхъ h меньше 3 дюймовъ, значенія коэффиціентовъ слѣдуетъ брать изъ таблицы, составленной на основаніи весьма тщательныхъ опытовъ Fteley'я и Stearns'a (The Graphical Solution of Hydraulic Problems by Freeman Coffin, p. 36).

Напоръ.	Коэфф. c.	Напоръ.	Коэфф. c.
0,5'	3,33	0,2'	3,388
0,4	3,337	0,15	3,430
0,3	3,353	0,10	3,528
0,25	3,368	0,06	3,750

Расходъ незатопленнаго водослива въ толстой стѣнкѣ.

Всѣ вышеприведенные формулы и коэффиціенты, дающіе весьма хорошіе результаты при рѣшеніи вопросовъ относительно водосливовъ, сдѣланныхъ въ тонкой стѣнкѣ, оказываются совершенно непримѣнимыми, когда приходится имѣть дѣло съ водосливомъ, прорѣзаннымъ въ толстой стѣнкѣ.

Конечно общій видъ формулы расхода будетъ тотъ-же, т. е.

$$Q = \mu' lh\sqrt{2gh}\,,$$

но значенія коэффиціента μ' будутъ совершенно другія. Слѣдующая таблица, составленная на основаніи опытовъ Poncelet et Lebros, даетъ эти значенія въ зависимости отъ величины h.

h въ метр.	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
μ'	0,196	0.234	0,263	0.278	0,286	0,292	0,297	0,301

h въ метр.	0,10	0,12	0,14	0.16	0,18	0,20	0,30
μ'	0,304	0,309	0.313	0,316	0,317	0,319	0,324

Очевидно, что, если средняя скорость подходящей къ водосливу воды есть v, то h слѣдуетъ взять по формулѣ:

$$h = \left\{(H + h_0)^{3/2} - h_0^{3/2}\right\}^{2/3}$$

гдѣ $h_0 = \dfrac{v^2}{2g}$.

Francis на основаніи своихъ наблюденій надъ водосливами, имѣвшими щирину порога до 3 футъ и h измѣнявшееся отъ 6 до 18 дюймовъ, вывелъ слѣдующую формулу расхода

$$Q = 3{,}01208 lH^{1.53}$$

Fteley и Stearns предлагаютъ опредѣлять расходъ черезъ водосливъ въ толстой стѣнкѣ по формулѣ для водосливовъ въ тонкой стѣнкѣ, замѣняя только въ нихъ напоръ H черезъ $H+\xi$, гдѣ

$$\xi = 0{,}2016\sqrt{H^2 - 1{,}614bH + 0{,}7658b^2} - 0{,}1876b.$$

Буквою b въ этой формулѣ обозначена ширина порога, при чемъ примѣнима она для ширинъ порога отъ 2 дюймовъ до 2 футъ.

Coffin на основанiи формулы Fteley'я и Stearns'а построилъ весьма интересную дiаграмму, идея которой заключается въ слѣдующемъ: положимъ, что намъ нужно найти расходъ водослива въ толстой стѣнкѣ при ширинѣ порога b, напорѣ h и длинѣ l. Находимъ сначала расходъ, соотвѣтствующiй водосливу въ тонкой стѣнкѣ при томъ-же напорѣ h и той-же длинѣ l. Величина расхода, очевидно, будетъ измѣняться въ зависимости отъ ширины порога, и измѣненiе это въ процентахъ мы и находимъ въ дiаграммѣ Coffin'а, гдѣ по даннымъ h и b мы находимъ процентное измѣненiе расхода сравнительно съ водосливомъ въ тонкой стѣнкѣ. Умножая полученный раньше расходъ водослива въ тонкой стѣнкѣ на найденное процентное измѣненiе, получаемъ искомый отвѣтъ (стр. 40).

Повѣрка водослива на пропускъ паводка.

Опредѣливъ вышеизложеннымъ способомъ уровень гребня водосливной плотины сообразно съ потребной для судоходства глубиной, слѣдуетъ сдѣлать повѣрку, насколько спроектированная плотина стѣснитъ проходъ самаго большого паводка.

Разсмотримъ сначала случай нормальнаго расположенiя плотины относительно оси потока.

Возьмемъ три поперечныхъ профиля: профиль n^o1 въ нѣсколькихъ метрахъ выше плотины; профиль n^o2 непосредственно ниже плотины (по лицевой стѣнкѣ ея) и профиль n^o3 въ нѣсколькихъ метрахъ ниже плотины (чер. 7).

Обозначимъ черезъ

H — высоту плотины.

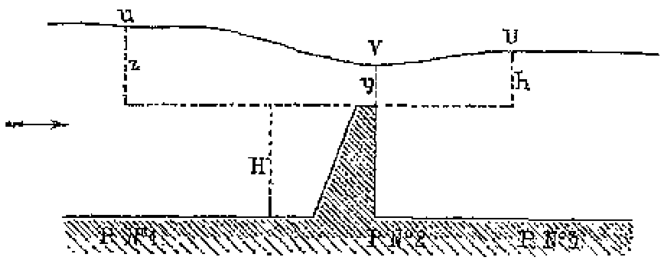
z — высоту воды въ профилѣ $n^\circ 1$ надъ горизонтальной плоскостью, проходящей черезъ гребень плотины.

y — толщину слоя протекающей черезъ гребень воды въ профилѣ $n^\circ 2$.

h — высоту воды въ профилѣ $n^\circ 3$ надъ горизонтальной плоскостью, проходящей черезъ гребень плотины.

u — среднюю скорость въ профилѣ $n^\circ 1$.

V — среднюю скорость воды при проходѣ черезъ плотину.



Чер. 7.

U — среднюю скорость въ профилѣ $n^\circ 3$.

Q — полный расходъ потока въ разсматриваемомъ состояніи.

q — расходъ на одинъ погонный метръ ширины потока.

L — ширину потока.

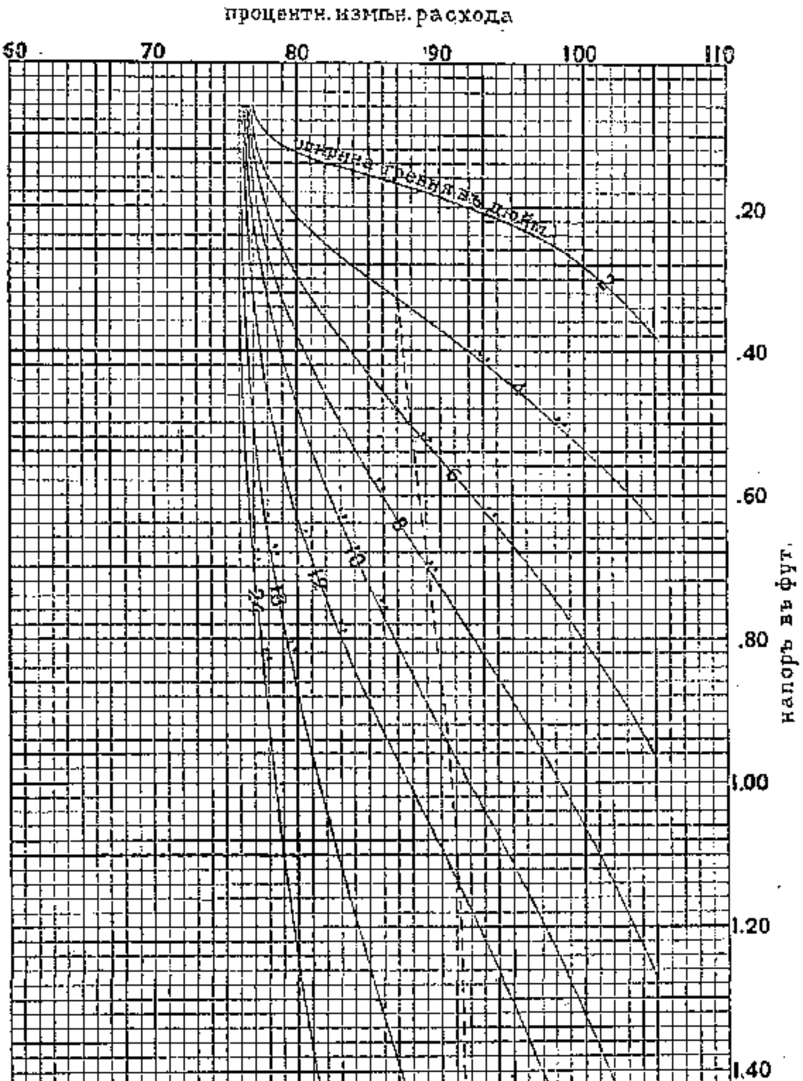
l — длину водослива.

Величины h, U и q извѣстныя, такъ какъ мы разсматриваемъ проходъ черезъ плотину опредѣленнаго паводка.

H и l предполагаются также извѣстными.

Неизвѣстными являются z и y.

Примѣнимъ теорему количествъ движенія $\Sigma m dv = \Sigma F dt$ къ массѣ жидкости, заключенной между профилями $n^\circ 2$ и $n^\circ 3$ для весьма короткаго періода времени θ.


процентн. измѣн. расхода
60
70
80
90
100
110
ширина гребня въ дюйм.
2
4
6
8
10
12
18
24
.20
.40
.60
.80
1.00
1.20
1.40
1.60
напоръ въ фут.

Діаграмма.

Масса жидкости, протекающая черезъ каждый изъ этихъ профилей въ періодъ θ, равна

$$\frac{\Delta Q\theta}{g},$$

и приращеніе количества движенія будетъ

$$\frac{\Delta Q\theta}{g}(U-V).$$

Сила, дѣйствующая на массу жидкости въ профилѣ $n^\circ 2$, есть давленіе

$$\Delta L(H+y)\frac{H+y}{2},$$

а импульсъ ея равенъ

$$\frac{\Delta\theta L}{2}(H+y)^2.$$

Подобнымъ-же образомъ находимъ импульсъ въ профилѣ $n^\circ 3$ равнымъ

$$-\frac{\Delta\theta L}{2}(H+h)^2.$$

Такимъ образомъ получаемъ равенство

$$\frac{\Delta Q\theta}{g}(U-V)=\frac{\Delta\theta L}{2}\left\{(H+y)^2-(H+h)^2\right\}$$

или

$$\frac{2q}{g}(U-V)=(H+y)^2-(H+h)^2.$$

Но по опредѣленію

$$U=\frac{q}{H+h} \text{ и } V=\frac{q}{y}.$$

Подставляя эти значенія въ вышеприведенное равенство, получимъ:

$$\frac{2q^2}{g}\left[\frac{1}{H+h}-\frac{1}{y}\right]=(H+y)^2-(H+h)^2$$

или

$$y^3+2Hy^2-\left[h(2H+h)+\frac{2q^2}{g(H+h)}\right]y+\frac{2q^2}{g}=0 \ldots (1)$$

—уравненіе, изъ котораго мы можемъ опредѣлить y.

Для нахожденія z примѣнимъ къ профилямъ $n^\circ 1$ и $n^\circ 2$ теорему Бернулли; получимъ:

$$\frac{V^2}{2g}-\frac{u^2}{2g}=z-y\,,$$

но по опредѣленію

$$V=\frac{q}{y} \text{ и } u=\frac{q}{H+z}\,.$$

Подставляя эти значенія, получимъ:

$$\frac{q^2}{2g}\left[\frac{1}{y^2}-\frac{1}{(H+z)^2}\right]=z-y\,.$$

Обозначая $H+z$ черезъ x, приводимъ уравненіе къ виду:

$$x^3-\left[H+y+\frac{q^2}{2g\,y^2}\right]x^2+\frac{q^2}{2g}=0 \quad \ldots\ldots (2).$$

Чтобы получить значеніе x, остается только въ уравненіе (2) подставить величину y, опредѣляемую уравненіемъ (1).

Приведенный методъ расчета даетъ Bresse въ своемъ сочиненіи „Cours d'hydraulique" (2-е edition, page 333).

Онъ примѣнимъ и въ томъ случаѣ, когда длина водослива l меньше ширины рѣки L; слѣдуетъ только въ этомъ случаѣ для расхода на одинъ погонный метръ брать выраженіе $\frac{Q}{l}$ вмѣсто $\frac{Q}{L}$, такъ какъ скорость въ частяхъ живого сѣченія, расположенныхъ непосредственно ниже плотины за незатопляемыми ея частями, очень незначительна, и потому можно предположить, что части эти не участвуютъ въ пропускѣ расхода Q.

Пояснимъ вышеприведенный расчетъ на числовомъ примѣрѣ: предположимъ, что построена плотина въ 3 метра высотою и 100 метровъ длиною нормально къ оси потока, расходъ котораго равенъ 1200 куб. метровъ, при чемъ глубину потока $H+h$ примемъ равной 6 метровъ. **Числовой примѣръ.**

Итакъ:

$H = 3$ метра.
$h = 3$ метра.
$Q = 1200$ куб. метр.
$q = 12$ куб. метр.

Подставляя эти значенія въ уравненіе (1), получимъ:

$$y^3 + 6y^2 - 31{,}89y + 29{,}35 = 0$$

—уравненіе, которое имѣетъ приблизительно корни

$y = 1{,}32$ метр.
$y = 2{,}31$ метр.

Первое значенье y, очевидно, не соотвѣтствуетъ дѣйствительности, такъ какъ оно даетъ высоту обратной волны ниже плотины слишкомъ неестественную, а именно $3 - 1{,}32 = 1{,}68$ метра, а для $H+z$ получается величина 8.40 метр.; т. е. подпоръ выше плотины получается въ 2,40 метра, чего также быть не можетъ.

Другое значеніе $y = 2{,}31$ даетъ болѣе подходящіе къ истинѣ результаты.

Въ самомъ дѣлѣ, подставляя въ уравненіе (2) вмѣсто y его значеніе 2,31 метр., получимъ:

$$x^3 - 6{,}686\ x^2 + 7{,}344 = 0;$$

приблизительный корень будетъ 6,51.

Такъ какъ естественная глубина потока равна 6 метр., то находимъ, что подпоръ $z-h$, производимый плотиной надъ горизонтомъ разсматриваемаго паводка, будетъ 0,51 метра, что правдоподобно.

Средняя скорость теченія надъ плотиной будетъ

$$V = \frac{q}{y} = \frac{12}{2,31} = 5,19 \text{ метра},$$

а высота обратной волны ниже плотины будетъ

$$h - y = 3 - 2,31 = 0,69 \text{ метра}.$$

Само собой разумѣется, что уравненія, положенныя въ основу вышеприведеннаго расчета, нельзя считать точными, а потому и на получаемые численные результаты нужно смотрѣть только какъ на приближенія.

Дѣйствительно, какъ въ первомъ уравненіи, касающемся примѣненія теоремы количествъ движенія между профилями $n^\circ 2$ и $n^\circ 3$, такъ и во второмъ, касающемся примѣненія теоремы Бернулли между профилями $n^\circ 1$ и $n^\circ 2$, сдѣлано предположеніе, что каждая струйка воды движется въ разсматриваемомъ профилѣ съ одинаковой средней скоростью. Кромѣ того не принято во вниманіе треніе и взаимное притяженіе частицъ жидкости. Все это вмѣстѣ даетъ въ результатѣ конечно погрѣшность, величину которой опредѣлить при современномъ состояніи науки невозможно.

Расходъ затопленнаго водослива по формулѣ Lebros.

Но лучше всего полученные расчетомъ результаты проконтролировать помощью эмпирической формулы.

Для даннаго случая имѣется такая формула, данная Lebros

$$q = \mu z \sqrt{2g(z-y)}.$$

Буквы, входящія въ нее, имѣютъ прежнее значеніе.

Что касается до коэффиціента μ, то величина его измѣняется въ зависимости отъ величины отношенія $\frac{z-y}{z}$. Lebros составилъ для него спеціальную таблицу, которую мы приводимъ ниже.

$\frac{z-y}{z}$	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
μ	0,227	0,295	0,363	0,430	0,496	0,556	0,597

$\frac{z-y}{z}$	0,008	0,009	0,010	0,015	0,020	0,025	0,030
μ	0,605	0,600	0,596	0,580	0,570	0,557	0,546

$\frac{z-y}{z}$	0,035	0,040	0,045	0,050	0,060	0,080	0,10
μ	0,537	0,531	0,526	0,522	0,519	0,517	0,516

$\frac{z-y}{z}$	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
μ	0,512	0,507	0,502	0,497	0,492	0,487	0,480

$\frac{z-y}{z}$	0,50	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
μ	0,474	0,466	0,459	0,444	0,427	0,409	0,390

Изъ этой таблицы видно, что среднія значенія μ мало отличаются отъ 0,45, какъ и въ случаѣ незатопленнаго водослива.

А потому для приблизительныхъ расчетовъ можно $\mu\sqrt{2g}$ принять равнымъ 2, тогда формула расхода будетъ:

$$q = 2z\sqrt{z-y}$$

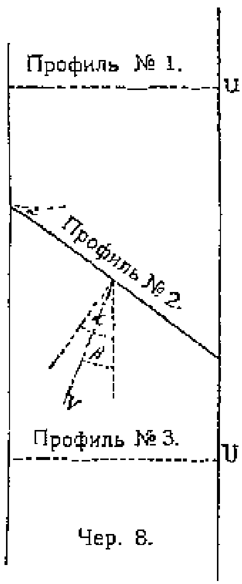
или

$$z^3 - z^2y - \frac{q^2}{4} = 0 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (3)$$

Когда y уже найдено, изъ уравненія (3) можемъ найти и z.

Для случая, когда плотина расположена подъ косымъ угломъ къ оси потока, Bresse не даетъ отдѣльнаго расчета, а потому Lagrené предлагаетъ на этотъ случай распространить тотъ же пріемъ. Мы считаемъ нужнымъ помѣстить здѣсь этотъ расчетъ, такъ какъ изъ него будетъ наглядно видно, какія преимущества представляетъ наклонное къ оси потока расположеніе плотины при пропускѣ паводка.

Разсмотримъ какъ и прежде, три поперечныхъ профиля: $n^0 1$ и $n^0 3$ взяты нормально къ оси потока, первый на разстояніи нѣсколькихъ метровъ выше плотины, а второй—ниже; $n^0 2$ взятъ непосредственно ниже плотины (по лицевой грани стѣнки съ низовой стороны плотины), а потому, составляетъ, какъ и плотина, уголъ α съ направленіемъ двухъ другихъ профилей (чер. 8).



Чер. 8.

Обозначимъ черезъ

H— высоту плотины.

$H+z$—высоту воды въ профилѣ $n^0 1$.

$H+h$—высоту воды въ профилѣ $n^0 3$.

y—толщину слоя протекающей черезъ гребень воды въ профилѣ $n^0 2$.

u—среднюю скорость въ профилѣ $n^0 1$.

U—среднюю скорость въ профилѣ $n^0 3$.

V—среднюю скорость воды при проходѣ черезъ плотину.

Эта послѣдняя скорость не параллельна оси потока, какъ скорости u и U, и не перпендикулярна къ направленію плотины: она имѣетъ нѣкоторое промежуточное между ними направленіе, которое зависитъ отъ величины u. Уголъ между u и V обозначимъ черезъ β и примемъ, что $\beta < \alpha$.

Если примѣнить принципъ проекцій количествъ движенія къ объему жидкости, заключенному между профилями $n^{\circ}2$ и $n^{\circ}3$, замѣтивъ, что проекція скорости V на вертикальную плоскость, параллельную оси потока, равно $V cos\beta$, то первый членъ равенства будетъ:

$$\frac{\Delta Q\theta}{g}\ (U - V cos\beta)$$

Давленіе на профиль $n^{\circ}2$ будетъ:

$$\Delta \cdot \frac{L}{cos\alpha} \cdot \frac{(H+y)^2}{2},$$

а потому проекція его на вышеупомянутую вертикальную плоскость будетъ:

$$\frac{\Delta L}{2}\ (H+y)^2,$$

проекція-же его импульса будетъ:

$$\frac{\Delta L\theta\,(H+y)^2}{2}.$$

Импульсъ въ профилѣ $n^{\circ}3$ равенъ

$$-\frac{\Delta L\theta}{2}\ (H+h)^2.$$

Итакъ уравненіе представится въ слѣдующемъ видѣ:

$$\frac{2q}{g}\ (U - V cos\beta) = (H+y)^2 - (H+h)^2.$$

Но

$$U = \frac{q}{H+h}\,;\quad V = \frac{q\, cos\alpha}{y},$$

а потому, подставляя эти значенія въ вышеприведенное уравненіе, получимъ:

$$\frac{2q^2}{g}\left(\frac{1}{H+h}-\frac{\cos\alpha\cdot\cos\beta}{y}\right)=(H+y)^2-(H+h)^2,$$
или

$$y^3+2Hy^2-\left[h(2H+h)+\frac{2q^2}{g(H+h)}\right]y+$$
$$+\frac{2q^2\cos\alpha\ \cos\beta}{g}=0.$$

Уголъ β неизвѣстенъ, но можно приблизительно принять $\beta=\frac{1}{2}\alpha$, откуда

$$\cos\beta=\sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}}.$$

Подставивъ въ вышеприведенное уравненіе вмѣсто $\cos\beta$ его новое значеніе, приведемъ его къ виду:

$$y^3+2Hy^2-\left[h(2H+h)+\frac{2q^2}{g(H+h)}\right]y+$$
$$+\frac{2q^2}{g}\cos\alpha\sqrt{\frac{1+\cos\alpha}{2}}=0\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ .\ (1'),$$

Уравненіе (1') даетъ возможность опредѣлить приблизительную величину y.

Чтобы найти z, примѣнимъ теорему Бернулли къ профилямъ $n^\circ 1$ и $n^\circ 2$, при чемъ вмѣсто скорости V возьмемъ, конечно, проекцію ея на вертикальную плоскость, параллельную оси потока, т. е. $V\cos\beta$; получимъ;

$$\frac{V^2\cos^2\beta}{2g}-\frac{u^2}{2g}=z-y.$$

Но

$$V=\frac{q\cos\alpha}{y},\ u=\frac{q}{H+z},\ H+z=x.$$

Подставляя эти значенія, имѣемъ:

$$\frac{q^2}{2g}\left[\frac{\cos^2\alpha\ \cos^2\beta}{y^2}-\frac{1}{x^2}\right]=x-(H+y).$$

Замѣняя $cos^2\beta$ черезъ $\frac{1+cos\alpha}{2}$, уравненіе приведемъ къ виду:

$$x^3 - \left[H + y + \frac{q^2}{2gy^2} cos^2\alpha \cdot \frac{1+cos\alpha}{2}\right] x^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \ldots (2')$$

Уравненіе (2′) даетъ величину x, а стало-быть и величину $z = x - H$.

Если полученныя нами уравненія (1′) и (2′) примѣнить къ тому-же самому численному примѣру, который былъ приведенъ выше, т. е. положить $H = 3$, $h = 3$, $q = 12$ и принять, что плотина составляетъ съ осью потока уголъ 60°, т. е. $\alpha = 30°$, то уравненіе (1′) послѣ подстановки приметъ видъ:

$$y^3 - 6y^2 - 31{,}89y + 24{,}53 = 0,$$

откуда приблизительное значеніе y получится равнымъ 2,61, и высота обратной волны ниже плотины будетъ:

$$h - y = 3 - 2{,}61 = 0{,}39 \text{ метра.}$$

Уравненіе (2′) послѣ подстановки будетъ:

$$x^3 - 6{,}35\ x^2 + 7{,}34 = 0,$$

откуда приблизительное значеніе x получается равнымъ 6,16.

Итакъ подпоръ, производимый плотиной, составляющей съ нормалью къ оси потока уголъ въ 30°, получается по расчету равнымъ 0,16 метра, между тѣмъ какъ аналогичный расчетъ для плотины, расположенной нормально къ теченію, при одинаковыхъ прочихъ условіяхъ, далъ для подпора величину 0,51 метра.

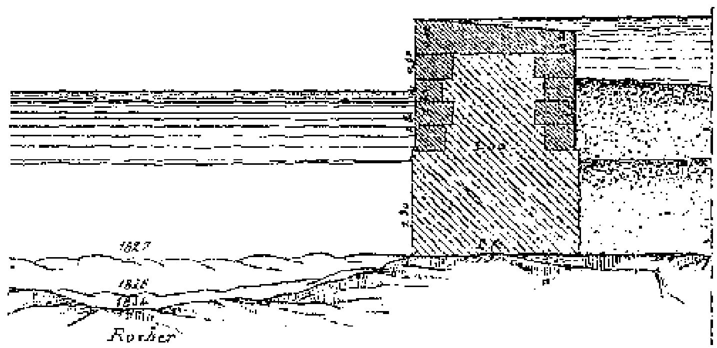
Выборъ формы поперечнаго сѣченія плотины.

Перейдемъ теперь къ изслѣдованію весьма важнаго вопроса о выборѣ формы поперечнаго сѣченія плотины, такъ какъ съ нимъ тѣсно связано явленіе большаго или меньшаго подмыва основанія плотины съ низовой стороны, при чемъ при разсмотрѣніи различныхъ типовъ плотинъ остановимся только на тѣхъ, которые близко подходятъ по формѣ профиля къ постоянной части разборчатыхъ плотинъ.

Разсмотримъ сначала плотину съ вертикальной низовой стѣнкой, которой обыкновенно даютъ толщину равную высотѣ напора.

Очевидно, что вода, переливаясь черезъ гребень ея, производитъ у подошвы плотины сильный ударъ, величина котораго увеличивается съ высотой паденія; въ результатѣ можетъ образоваться подмывъ, а потому такой типъ можетъ быть примѣнимъ только тогда, когда русло рѣки каменистое, неподдающееся размыву и ударамъ льдинъ.

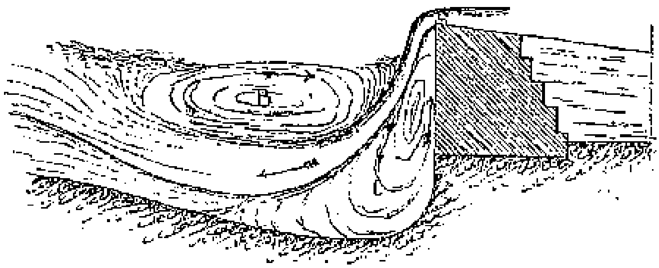
Верхней грани водослива обыкновенно дается уклонъ обратный теченію, чтобы защитить верховое ребро отъ удара плавающихъ тѣлъ и льда (чер. 9).



Чер. 9.

Преимущество такой формы профиля заключается въ томъ, что благодаря ей скорость протекающаго черезъ водосливъ потока сразу теряется и отзывается въ нижнемъ бьефѣ на очень короткомъ протяженіи, а это весьма важно для взводнаго судоходства.

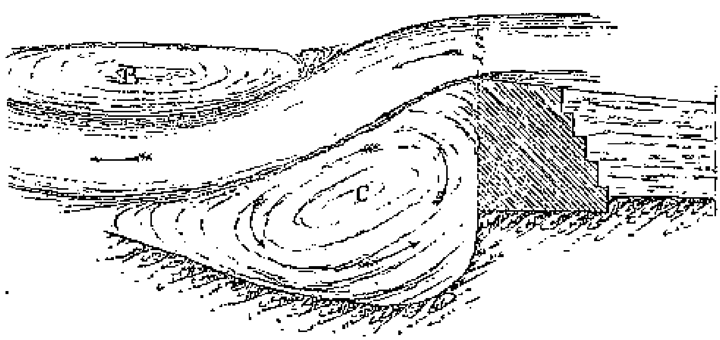
Но преимущество это значительно умаляется, если мы обратимъ вниманіе на то, что съ низовой стороны плотины образуются два водоворота съ горизонтальными осями, одинъ надъ, а другой подъ переливающейся черезъ водосливъ волной. Эти водовороты указаны на чер. 10 и 11. Такой видъ они имѣли на рѣкѣ d'Jsle съ низовой стороны плотины, поддерживав-



Чер. 10.

шей подпоръ въ 2 метра, при чемъ толщина переливавшейся черезъ водосливъ волны варьировала отъ 0,50 метра (чер. 10) до 2,50 метра (чер. 11).

Верхнiй водоворотъ *B* не оказываетъ никакого вреднаго дѣйствiя ни на основанiе плотины, ни на нее самоё; онъ опасенъ только для судовъ, которыя имѣ-



Чер. 11.

ютъ неосторожность близко подойти къ нему; такъ, примѣръ плотины на рѣкѣ d'Jsle показалъ, что суда, подходившiя къ плотинѣ ближе чѣмъ на 12 метровъ, подхватывались водоворотомъ и отбрасывались вверхъ по теченiю на вертикальную стѣнку плотины.

Что касается до нижняго водоворота C, то опытъ показываетъ, что подъ его вліяніемъ и происходитъ подмывъ основанія плотины и даже разстройство каменной кладки.

Такъ какъ онъ долженъ имѣть линейную скорость приблизительно равную скорости протеканія воды черезъ водосливъ, то становится понятной та разрушительная сила, которой онъ обладаетъ.

Важно отмѣтить еще то явленіе, что объемъ нижняго водоворота увеличивается по мѣрѣ увеличенія толщины переливающейся черезъ водосливъ волны, а потому разрушительное дѣйствіе его очень значительно во время прохода паводка, когда даже самъ подпоръ плотины незначителенъ.

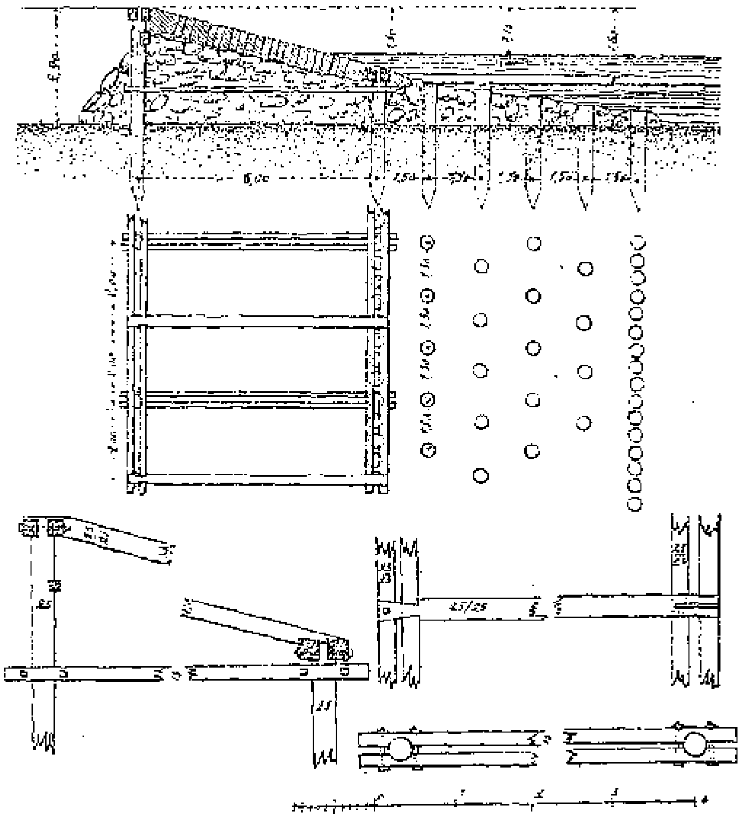
Верхній водоворотъ B, напротивъ, ослабѣваетъ по мѣрѣ уменьшенія подпора, откуда, очевидно, и сложилось у нѣкоторыхъ гидротехниковъ убѣжденіе, что дѣйствіе плотины во время паводковъ ослабѣваетъ. Что убѣжденіе это до извѣстной степени неправильно, ясно изъ только что приведенныхъ соображеній.

Кромѣ того и практика показываетъ, что, если и бывали случаи опрокидыванія плотинъ, то обыкновенно во время прохода паводка.

Чтобы предохранить основаніе плотины отъ подмыва, съ низовой стороны ея устраивали рисбермы на протяженіи 10—12 метровъ, но попытки эти не имѣли успѣха, и можно считать почти доказаннымъ, что плотины только что разсмотрѣннаго типа подвергаются большимъ деформаціямъ, если только онѣ основаны на грунтѣ, поддающемся размыву, и должны пропускать по временамъ значительные паводки.

Плотины съ низовой стѣнкой, имѣющей видъ наклонной плоскости, обладаютъ тѣмъ преимуществомъ, что позади нихъ образуется только одинъ верхній водоворотъ, безвредный для самой плотины, но за то откосъ AA', очевидно, подвергается довольно сильному изнашиванію благодаря тренію переливающейся съ большой скоростью воды.

Для удобства при производствѣ ремонта плотину составляютъ какъ-бы изъ нѣсколькихъ независимыхъ частей посредствомъ устройства двухъ деревянныхъ перегородокъ—верховой и низовой, соединенныхъ между собой деревянными-же связями (чер. 12). Простран-



Чер. 12.

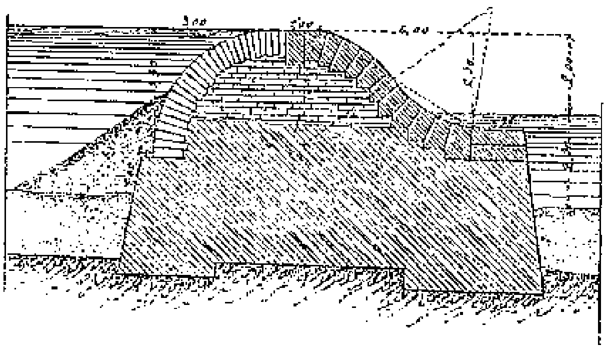
ство между этими двумя перегородками можетъ быть заполнено бутовой кладкой, или бетономъ, или даже простой наброской изъ камней среднихъ размѣровъ, пустоты между которыми должны быть заполнены щебнемъ или гравіемъ. Поверхность откоса AA' должна быть образована изъ крупныхъ тесаныхъ камней, плотно пригнанныхъ другъ къ другу и къ шапочнымъ брусьямъ.

Во всѣхъ случаяхъ, т. е. каково-бы ни было заполненіе пространства между перегородками, низовому или сливному откосу плотины дается уклонъ отъ 3 до 5 основаній на единицу высоту, т. е. тройной или даже пятерной откосъ (Minard. Cours de navigation).

Съ верховой стороны такой плотины дѣлается отсыпь изъ накидного камня, а съ низовой забиваютъ нѣсколько рядовъ свай въ шахматномъ порядкѣ, и пространство между ними заполняется наброскою изъ крупныхъ камней.

Примѣръ такой плотины представляетъ плотина на рѣкѣ L'Oise, изображенная на чер. 12.

Плотины, образованныя изъ сухой каменной кладки или изъ накидного камня, конечно весьма проницаемы водой, которая, входя подъ сильнымъ напоромъ въ промежутки между камнями, можетъ поднимать и перемѣщать ихъ на флюдбетѣ; поэтому-то

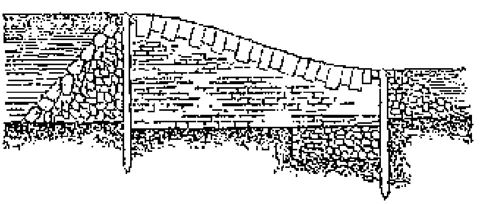


Чер. 13.

весьма полезны деревянные остовы, или скелеты, которые удерживаютъ камни и не даютъ поврежденію въ флюдбетѣ распространяться на большомъ пространствѣ.

Къ плотинамъ только что описаннаго типа близко подходятъ и плотины, ограниченныя сверху частью выпуклою и частью вогнутою кривою (чер. 13). Эта форма профиля съ теоретической точки зрѣнія наивыгоднѣйшая, такъ какъ она соотвѣтствуетъ направленію переливающейся черезъ плотину воды, благодаря чему направленіе скорости волны въ моментъ, когда она покидаетъ плотину, становится почти горизонтальнымъ, и подмыва дна не происходитъ; но за то вліяніе этой скорости въ горизонтальномъ направленіи отзывается на очень большомъ протяженіи, стремясь отбросить каменную отсыпь внизъ по теченію. Для удержанія камней хорошо забить между ними сваи въ шахматномъ порядкѣ, спиливши ихъ головы приблизительно на уровнѣ нижняго бьефа.

Весьма крупнымъ недостаткомъ такой формы плотины служитъ то обстоятельство, что она требуетъ обтески камней флюдбета, обходящейся довольно дорого; при томъ выпуклыя кривыя представляютъ то важное неудобство, что въ нихъ толщина камней въ наружной части болѣе, чѣмъ въ хвостѣ; поэтому вода, проникая во внутрь кладки, можетъ поднимать камни и вытѣснить ихъ наружу. А если одинъ камень будетъ сдвинутъ съ мѣста, то всѣ упирающіеся въ него также должны подвергнуться той-же участи.



Чер. 14.

Послѣдній недостатокъ будетъ устраненъ, если сопряженіе плотины съ горизонтомъ нижняго бьефа сдѣлано помощью вогнутой кривой, такъ какъ въ этомъ случаѣ камни имѣютъ бóльшую толщину въ хвостѣ, чѣмъ на откосѣ (чер. 14).

Постоянная часть водосливныхъ плотинъ на Марнѣ представляетъ прекрасный примѣръ изогнутого профиля съ каменной отсыпью и сваями, расположенными въ шахматномъ порядкѣ, съ низовой стороны плотины.

Важное значеніе рисбермы.

Каменная отсыпь, устраиваемая съ низовой стороны плотины, имѣетъ громадное значеніе, и большею частью отъ ея выбора, расположенія и содержанія въ исправности зависитъ сохранность самой плотины.

Многіе авторы, занимавшіеся изученіемъ этого вопроса, въ своихъ сочиненіяхъ говорятъ о глубинѣ заложенія и о протяженіи каменной отсыпи, но по мнѣнію Lagrené они мало обратили вниманія на объемъ, или, вѣрнѣе, на тотъ вѣсъ, который долженъ имѣть каждый отдѣльный камень, на который падаетъ волна, чтобы не быть сброшеннымъ въ сторону нижняго бьефа.

Для болѣе яснаго представленія о данномъ вопросѣ, считаемъ небезъинтереснымъ помѣстить тотъ приблизительный расчетъ, который Lagrené приводитъ въ своемъ трудѣ „Cours de navigation interieure".

Разсмотримъ отдѣльный камень въ видѣ куба, сторону котораго обозначимъ черезъ a, и положимъ, что онъ лежитъ на откосѣ отсыпи такъ, что протекающая черезъ водосливъ волна ударяетъ нормально въ одну изъ его сторонъ.

Обозначимъ черезъ V скорость въ моментъ этого удара.

Давленіе, которое волна оказываетъ на камень, равно

$$1000\,\frac{K}{2g}\,V^2a^2\,.$$

Пусть h будетъ высота паденія, считая ее отъ горизонта верхняго бьефа до разсматриваемаго камня, который предполагаемъ непокрытымъ водою нижняго бьефа; тогда имѣемъ:

$$V^2 = 2gh\,,$$

и давленіе, испытываемое камнемъ, стало быть равно

$$1000Kha^2\,,$$

гдѣ K—коэффиціентъ, величина котораго колеблется между 1,10 и 1,60.

Вѣсъ камня равенъ $2000a^3$. Если черезъ α обозначимъ уголъ, составляемый откосомъ каменной наброски съ горизонтомъ, то сила, стремящаяся сдвинуть камень, равна

$$1000Kha^2 + 2000a^3 \sin\alpha .$$

Треніе, препятствующее этому сдвигу, равно

$$2000fa^3 \cos\alpha ,$$

гдѣ коэффиціентъ f можетъ имѣть различныя значенія, зависящія отъ характера самой каменной отсыпи.

Уравненіе, изображающее равенство этихъ двухъ силъ, будетъ:

$$1000Kha^2 + 2000a^3 \sin\alpha = 2000fa^3 \cos\alpha ,$$

или

$$a = h \frac{K}{2(f\cos\alpha - \sin\alpha)} .$$

Если принять $f = 0{,}74, \alpha = 6^\circ$, $K = 1{,}20$, то

$$a = 0{,}95h .$$

Такимъ образомъ, чтобы гарантировать себя отъ возможности сдвига камней, слѣдуетъ имъ придавать при принятыхъ условіяхъ въ среднемъ размѣры приблизительно равные высотѣ паденія.

Для того, чтобы тотъ-же камень не могъ быть опрокинутъ около нижняго ребра, необходимо соблюденіе слѣдующаго условія:

$$1000Kha^2 + 2000a^3 \sin\alpha < 2000a^3 \cos\alpha ,$$

или

$$a > h \frac{K}{2(\cos\alpha - \sin\alpha)} ,$$

откуда, принимая вышеприведенныя цифровыя данныя, получаемъ

$$a > 0{,}67h .$$

Конечно, въ дѣйствительности камни отсыпи не имѣютъ кубической формы, между ними обнаруживается сцѣпленіе, бо́льшая часть ихъ прикрыта на нѣкоторую высоту водою нижняго бьефа, но все это нисколько не ослабляетъ полученнаго вывода, а именно, что отдѣльные камни должны имѣть большіе размѣры, приблизительно равные высотѣ паденія.

Высота паденія слагается изъ двухъ элементовъ— высоты гребня водослива надъ горизонтомъ нижняго бьефа и толщины протекающей черезъ водосливъ волны.

Формула расхода водослива $Q = 2lz\sqrt{z}$ показываетъ, что z быстро уменьшается при увеличеніи l, а потому весьма важно дѣлать водосливы длиннѣе.

Важность сдѣланнаго замѣчанія становится еще болѣе очевидной, если, вмѣсто того чтобы разсматривать условія устойчивости каменной наброски, обратиться къ силѣ, производящей подмывъ плотины, такъ какъ эта сила зависитъ отъ массы жидкости, протекающей въ единицу времени черезъ единицу длины водослива. Lagrené былъ самъ очевидцемъ того, какъ въ плотинахъ на Сенѣ каменная отсыпь, состоявшая изъ камней, имѣвшихъ размѣры около 0,30 метра, въ какихъ нибудь нѣсколько часовъ была размыта на протяженіи 15 метровъ на глубину около 4 метровъ, считая отъ горизонта нижняго бьефа, волною, падавшею съ высоты двухъ метровъ и прорвавшеюся черезъ нѣсколько опрокинутыхъ щитовъ.

На рѣкѣ d'Isle бутовый камень, имѣвшій въ среднемъ объемъ около 0,20 куб. метр. былъ далеко отброшенъ паводкомъ при высотѣ паденія около 2 метр.

По мнѣнію Lagrené каменная отсыпь съ низовой стороны водослива должна всегда состоять изъ большихъ каменныхъ глыбъ, а если карьеры, изъ которыхъ приходится брать камни, не даютъ такихъ, то слѣдуетъ прибѣгнуть къ искусственнымъ массивамъ изъ бетона или бутовой кладки подобно тому, какъ это практикуется въ портовыхъ сооруженіяхъ. Промежутки между большими камнями слѣдуетъ заполнять мелкими камнями, щебнемъ или гравіемъ, при чемъ заполненіе это нужно производить постепенно вмѣстѣ съ возведеніемъ самой отсыпи, чтобы дать возможность ей лучше осѣсть и помѣшать водѣ вымывать естественный грунтъ изъ подъ отсыпи.

Взять съ самаго начала большіе камни экономичнѣе и съ точки зрѣнія послѣдующаго ремонта, и Lagrené высказываетъ мнѣніе, что многія изъ опрокинутыхъ плотинъ навѣрное существовали-бы до сихъ поръ, если-бы только были защищены камнями величиной въ одинъ или два кубическихъ метра.

Mary въ своемъ „Cours autographié" говоритъ, что каменная отсыпь должна устраиваться на протяженіи, равномъ по крайней мѣрѣ 20 разъ взятой высотѣ паденія плотины, если русло песчаное или гравелистое, при чемъ протяженіе это онъ считаетъ возможнымъ уменьшить, если отсыпь будетъ образована изъ крупныхъ камней.

Что касается до глубины, на которой слѣдуетъ заложить массивъ отсыпи, считая отъ горизонта нижняго бьефа, то Mary считаетъ достаточной глубиной 1,70 метра. На страницѣ 55 своего труда онъ говоритъ по этому поводу слѣдующее: „Если съ низовой стороны плотины имѣется слишкомъ малая глубина для того, чтобы можно было прямо на днѣ устроить наброску толщиной отъ 0,60 до 0,70 метра, оставивъ еще надъ ней такую же глубину, то сначала вырываютъ ниже плотины ровъ требуемой глубины и затѣмъ уже приступаютъ къ разбивкѣ и возведенію отсыпи".

Тѣ же самые взгляды высказываетъ и Guillemain въ своемъ трудѣ „Navigation inrerieure".

Lagrené вполнѣ справедливо по нашему мнѣнію находитъ такія указанія неудовлетворительными и полагаетъ, что въ настоящемъ вопросѣ не можетъ быть дано какого-либо общаго правила: въ каждомъ частномъ случаѣ въ зависимости отъ высоты паденія, толщины переливающейся черезъ водосливъ волны и характера основанія инженеръ долженъ самъ рѣшить, на какой глубинѣ ему слѣдуетъ остановиться.

Въ заключеніе считаемъ нелишнимъ замѣтить, что разрушеніе водосливныхъ плотинъ происходитъ не всегда отъ подмыва съ низовой стороны: иногда подпертая вода прокладывала себѣ ходъ за береговыми устоями и образовавшимися боковыми потоками мало по малу сносила плотину. Такимъ образомъ, напримѣръ, ниже Парижа вода обошла съ боковъ водосливъ de Courbevoie и снесла его въ ночь съ 17 на 18 августа 1868 года.

Чтобы устранить возможность подобнаго разрушенія, нужно на довольно большое протяженіе тщательно врѣзать концы плотины въ берега, приподнять корни плотинъ а также и самые берега въ этихъ мѣстахъ выше горизонта наибольшаго паводка, откосы укрѣпить мостовой, а снизу закрыть наброской изъ крупныхъ камней; въ корняхъ слѣдуетъ отказаться отъ всякихъ горизонтальныхъ схватокъ перемычекъ и замѣнить ихъ въ случаѣ необходимости плоскими желѣзными полосами, помѣщенными на различныхъ уровняхъ.

Таблица для подсчета высотъ и протяженій подпоровъ, составленная генеральнымъ инспекторомъ Dupuit.

Для того чтобы можно было пользоваться приведенною ниже таблицею, нужно прежде всего неправильной формы живое сѣченіе потока обратить въ правильное прямоугольное съ тѣмъ условіемъ, чтобы уклонъ, ширина и расходъ потока остались тѣ же самые.

Глубина этого прямоугольнаго сѣченія потока, которую мы назовемъ глубиною при равномѣрномъ режимѣ, находится изъ уравненія

$$Hi = \alpha U + \beta U^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1).$$

Для α и β слѣдуетъ взять значенія $\alpha = 0{,}0000243$ и $\beta = 0{,}000366$. Посредствомъ нивеллировки мы можемъ найти уклонъ потока i. Среднюю скорость получимъ, взявъ $^4/_5$ отъ скорости по оси потока, или отношеніе $\frac{Q}{\Omega}$, если извѣстенъ расходъ Q. Такъ какъ ширина и площади живыхъ сѣченій потока неодинаковы въ различныхъ профиляхъ, то слѣдуетъ брать среднія изъ этихъ величинъ. Величину H, даваемую вышеприведеннымъ уравненіемъ (1), слѣдуетъ сравнить съ той, которая получается изъ отношенія $\frac{Q}{\Omega}$. Если эти величины совпадаютъ, то это гарантируетъ полученіе точныхъ результатовъ.

Хорошо кромѣ того при рѣшеніи практическихъ вопросовъ сдѣлать два параллельныхъ подсчета соотвѣтственно крайнимъ значеніямъ H, что дастъ возможность судить о предѣлахъ возможной ошибки.

Когда извѣстны уклонъ потока i и его глубина H при равномѣрномъ режимѣ, всѣ практическія задачи относительно распространенія подпора могутъ быть раздѣлены на три слѣдующія категоріи:

1. Зная высоту подпора Y въ нижнемъ концѣ даннаго участка и высоту y въ верхнемъ концѣ, опредѣлить разстояніе S между ними.

2. Зная высоту подпора Y въ нижнемъ концѣ и разстояніе S, опредѣлить высоту подпора y въ верхнемъ концѣ.

3. Зная подпоръ въ верхнемъ концѣ y и разстояніе S, опредѣлить высоту подпора Y въ нижнемъ концѣ.

Для того чтобы рѣшить эти задачи посредствомъ приведенныхъ ниже таблицъ, нужно прежде всего обратить данныя высоты подпоровъ въ табличныя, раздѣливъ ихъ на глубину при равномѣрномъ режимѣ.

Дѣлается это для того, чтобы разсматриваемый въ задачѣ потокъ привести къ условіямъ потока, для котораго составлены таблицы.

Первый столбецъ таблицъ представляетъ высоты подпора; второй представляетъ разстоянія до нѣкоторой произвольной точки, принятой за начало. (Эта точка въ таблицѣ взята на разстояніи 0,0067 метра выше по теченію точки съ высотой подпора въ 0,01 метръ).

Итакъ мы видимъ, что, найдя разстоянія отъ начальной точки двухъ точекъ съ извѣстными высотами подпора, мы вмѣстѣ съ тѣмъ находимъ и разстояніе между ними. Подобнымъ-же образомъ, въ случаѣ второй или третьей задачи, находимъ табличное разстояніе до точки, въ которой высота подпора извѣстна, прибавляемъ къ нему или вычитаемъ данное разстояніе и получаемъ табличное разстояніе точки съ искомой высотой подпора, а слѣдовательно и самый подпоръ, такъ какъ величина его указана рядомъ въ сосѣднемъ столбцѣ.

Такимъ образомъ задача рѣшена для потока, соотвѣтствующаго таблицѣ.

Для того чтобы получить рѣшенія для даннаго потока, достаточно умножить найденныя высоты подпоровъ на H—глубину при равномѣрномъ режимѣ, а найденныя разстоянія—на то-же H, дѣленное на уклонъ.

Поясним это на численныхъ примѣрахъ:

Первая задача.—Въ потокѣ, глубина котораго при равномѣрномъ режимѣ равна 1,05 метра, а уклонъ 0,000115 возведена плотина съ подпоромъ въ 1,50 метра; требуется опредѣлить, на какомъ разстояніи отъ плотины подпоръ будетъ равенъ 0,60 метра.

Приводя данныя задачи къ табличнымъ, имѣемъ

$$Y' = \frac{Y}{H} = \frac{1,50}{1,05} = 1,43.$$

$$y' = \frac{y}{H} = \frac{0,60}{1,05} = 0,57.$$

Отыскиваемъ въ таблицѣ разстояніе точки съ подпоромъ въ 1,43 метра отъ начальной точки; находимъ 2,7586

Такимъ-же путемъ для точки съ подпоромъ въ 0,57 метра находимъ . . . . 1,7579.

Разность 1,0007

выражаетъ разстояніе между разсматриваемыми точками для табличнаго потока. Чтобы перейти къ потоку, данному въ задачѣ, достаточно принять:

$$\frac{iS}{H} = 1,0007, \text{ откуда } S = 1,0007 \cdot \frac{1,05}{0,000115} = 9137 \text{ метр.}$$

Вторая задача.—Въ томъ-же потокѣ въ нѣкоторой точкѣ вода подперта на высоту въ 1,50 метра;

требуется опредѣлить, какова высота подпора въ точкѣ, отстоящей отъ первой на разстояніи 9137 метровъ, вверхъ по теченію.

Табличное разстояніе точки съ подпоромъ
$Y' = \frac{Y}{H} = \frac{1,50}{1,05} = 1,43$ равно 2,7586

Вычтемъ изъ него табличное разстояніе между разсматриваемыми точками, равное
$\frac{9137 . 0,000115}{1,05} =$ . . . . 1,0007.

Получаемъ табличное разстояніе точки съ искомымъ подпоромъ . . . . 1,7579.

Въ таблицѣ отыскиваемъ ординату, соотвѣтствующую найденному табличному разстоянію; находимъ 0,57 метра. Умноживъ послѣднюю величину на 1,05, получимъ 0,60 метра — рѣшеніе задачи.

Третья задача.—Въ томъ-же потокѣ желательно поднять воду въ нѣкоторой точкѣ на высоту въ 0,60 метра посредствомъ устройства плотины на разстояніи 9137 метра ниже по теченію; требуется опредѣлить, какой подпоръ должна будетъ поддерживать плотина.

Табличное разстояніе точки съ подпоромъ въ
$\frac{0,60}{1,05} = 0,57$ метра равно 1,7579

Прибавляемъ къ нему табличное разстояніе между разсматриваемыми точками, равное
$\frac{9137 . 0,000115}{1,05} =$ . . . . 1,0007.

Получаемъ табличное разстояніе точки съ искомымъ подпоромъ. . . . . 2,7586.

Въ таблицѣ отыскиваемъ высоту подпора, соотвѣтствующую найденному табличному разстоянію; находимъ 1,43 метра. Умноживъ послѣднюю на 1,05, получимъ 1,50 метра—рѣшеніе задачи.

Примѣчаніе. — Во всѣхъ вышеприведенныхъ расчетахъ предполагалось, что подводное сѣченіе канала одинаково на всемъ протяженіи разсматриваемаго подпора. Если есть значительная разница въ поперечныхъ профиляхъ, то ее слѣдуетъ принять во вниманіе, раздѣливъ каналъ по длинѣ на нѣсколько частей съ различными сѣченіями, и для каждой части произвести отдѣльный подсчетъ, примѣняя къ ней таблицу, при чемъ начинать слѣдуетъ, конечно, съ точки, въ которой высота подпора извѣстна, и идти вверхъ и внизъ до мѣстъ перемѣны сѣченія; опредѣливъ въ этихъ мѣстахъ высоты подпоровъ, поступаютъ и дальше такимъ-же образомъ, пока не найденъ будетъ искомый подпоръ или искомое разстояніе.

Высоты подпоровъ надъ поверхн. равномѣр. режима $\frac{Y}{H}$	Разстоянія подпоровъ $\frac{Y}{H}$	
	отъ табличн. начала $\frac{iS}{H}$	отъ сосѣдняго подпора (вышелеш.)
0,01	0,0067	0,2377
0,02	0,2444	0,1419
0,03	0,3863	0,1026
0,04	0,4889	0,0812
0,05	0,5701	0,0675
0,06	0,6376	0,0582
0,07	0,6958	0,0514
0,08	0,7472	0,0461
0,09	0,7933	0,0420
0,10	0,8353	0,0386
0,11	0,8739	0,0359
0,12	0,9098	0,0336
0,13	0,9434	0,0317
0,14	0,9751	0,0300
0,15	1,0051	0,0284

Высоты подпоровъ надъ поверхн. равномѣр. режима. $\frac{Y}{H}$	Разстоянія подпоровъ $\frac{Y}{H}$	
	отъ табличн. начала $\frac{iS}{H}$	отъ сосѣдняго подпора (вышележ.)
0,16	1,0335	0,0273
0,17	1,0608	0,0260
0,18	1,0868	0,0251
0,19	1,1119	0,0242
0,20	1,1361	0,0233
0,21	1.1594	0,0226
0,22	1,1820	0,0220
0,23	1,2040	0,0213
0,24	1,2253	0,0207
0,25	1,2460	0,0203
0,26	1,2663	0,0197
0,27	1,2860	0,0193
0,28	1,3053	0,0190
0,29	1,3243	0,0185
0,30	1,3428	0.0182
0,31	1,3610	0.0178
0,32	1,3788	0,0176
0,33	1,3964	0,0172
0,34	1,4136	0,0170
0,35	1,4306	0,0167
0,36	1.4473	0,0165
0,37	1,4638	0,0163
0,38	1,4801	0,0160
0,39	1,4961	0,0158
0,40	1,5119	0,0157
0,41	1,5276	0,0154

Высоты подпоровъ надъ поверхн. равномѣр. режима $\frac{Y}{H}$	Разстоянія подпоровъ $\frac{Y}{H}$	
	отъ табличн. начала $\frac{iS}{H}$	отъ сосѣдняго подпора (вышележ.)
0,42	1,5430	0,0153
0,43	1,5583	0,0151
0,44	1,5734	0,0150
0,45	1,5884	0,0148
0,46	1,6032	0,0146
0,47	1,6178	0,0146
0,48	1,6324	0,0144
0,49	1,6468	0,0143
0,50	1,6611	0,0141
0,51	1,6752	0,0141
0,52	1,6893	0,0139
0,53	1,7032	0,0138
0,54	1,7170	0,0137
0,55	1,7307	0,0137
0,56	1,7444	0,0135
0,57	1,7579	0,0134
0,58	1,7713	0,0134
0,59	1,7847	0,0133
0,60	1,7980	0,0132
0,61	1,8112	0,0131
0,62	1,8243	0,0130
0,63	1,8373	0,0129
0,64	1,8502	0,0129
0,65	1,8631	0,0128
0,66	1,8759	0,0128
0,67	1,8887	0,0127

Высоты подпоровъ надъ поверхн. равномѣр. режима. $\frac{Y}{H}$	Разстоянія подпоровъ $\frac{Y}{H}$	
	отъ табличн. начала $\frac{iS}{H}$	отъ сосѣдняго подпора (вышележ.)
0,68	$1,^{\text{м}}9014$	$0,^{\text{м}}0126$
0,69	1,9140	0,0126
0,70	1,9266	0,0125
0,71	1,9391	0,0125
0,72	1,9516	0,0124
0,73	1,9640	0,0124
0,74	1,9764	0,0123
0,75	1,9887	0,0123
0,76	2,0010	0,0122
0,77	2,0132	0,0122
0,78	2,0254	0,0121
0,79	2,0375	0,0121
0,80	2,0496	0,0121
0,81	2,0617	0,0120
0,82	2,0737	0,0119
0,83	2,0856	0,0119
0,84	2,0976	0,0119
0,85	2,1095	0,0118
0,86	2,1213	0,0118
0,87	2,1331	0,0118
0,88	2,1449	0,0118
0,89	2,1556	0,0118
0,90	2,1684	0,0117
0,91	2,1801	0,0116
0,92	2,1917	0,0116
0,93	2,2033	0,0116

Высоты подпоровъ надъ поверхн. равномѣр. режима. $\frac{Y}{H}$	Разстоянія подпоровъ $\frac{Y}{H}$	
	отъ табличн. начала $\frac{iS}{H}$	отъ сосѣдняго подпора (вышележ.)
0,94	$2,^{m}2149$	
0,95	2,2265	$0,^{m}0116$
0,96	2,2381	0,0116
0,97	2,2496	0,0115
0,98	2,2611	0,0115
0,99	2,2725	0,0115
1,00	2,2840	0,0115
1,10	2,3971	0,1131
1,20	2,5083	0,1112
1,30	2,6179	0,1096
1,40	2,7264	0,1085
1,50	2,8337	0,1073
1,60	2,9401	0,1064
1,70	3,0458	0,1057
1,80	3,1508	0,1050
1,90	3,2553	0,1045
2,00	3,3594	0,1041
2,10	3.4631	0,1037
2,20	3,5564	0,1033
2,30	3,6694	0,1030
2,40	3,7720	0,1026
2,50	3,8745	0,1025
2,60	3,9768	0,1023
2,70	4,0789	0,1021
2,80	4,1808	0,1019
2,90	4,2826	0,1018
3,00	4,3843	0,1017

Часть II.

Несмотря на то, что строительная механика благодаря разработкѣ теорiи упругости въ настоящее время можетъ считаться стоящею на твердомъ основанiи и достаточно точною для широкаго примѣненiя ея въ инженерной практикѣ, пользованiе ею при проектированiи гидротехническихъ сооруженiй оказывается крайне затруднительнымъ и требуетъ большой осторожности главнымъ образомъ потому, что здѣсь она сталкивается съ такимъ отдѣломъ гидродинамики, который въ настоящее время справедливо можно назвать наименѣе разработаннымъ, а именно, съ вопросомъ о гидродинамическомъ давленiи потока на твердое тѣло. Введенiе.

Конечно, изъ этого не слѣдуетъ, что она имѣетъ для гидротехника второстепенное значенiе; здѣсь является только новое условiе, повѣрять результаты, полученные расчетомъ, данными опыта, т. е. руководиться непремѣнно и примѣрами существующихъ сооруженiй, которыя оказались вполнѣ отвѣчающими своему назначенiю и находятся въ условiяхъ весьма близкихъ къ разсматриваемому случаю.

Необходимость такой повѣрки очевидна уже изъ того, что почти всѣ гидродинамическiе расчеты приходится основывать на различныхъ гипотезахъ, а потому и на получаемые результаты слѣдуетъ смотрѣть только какъ на приближенiя.

Весьма слабая разработка расчетной части гидротехники заставляетъ насъ дорожить и тѣмъ немногимъ матеріаломъ, который намъ дали наши предшественники на этомъ поприщѣ, а особенно такіе, какъ французскіе инженеры Lagrené и Guillemain, извѣстные кромѣ того своей выдающейся практической дѣятельностью: ихъ изслѣдованія, хотя и не отличающіяся особенной математической точностью, имѣютъ особую цѣну потому, что у нихъ на первомъ планѣ было стремленіе сблизить теорію съ практикой.

Ввиду этого мы считаемъ весьма полезнымъ въ настоящемъ трудѣ помѣстить тѣ пріемы расчета, которые дали вышеупомянутые инженеры для повѣрки прочности нѣкоторыхъ частей разборчатыхъ плотинъ, при чемъ мы разсмотримъ только три наиболѣе распространенныхъ на практикѣ типа, а именно Poirée, Chanoine'a и Desfontaines'a*).

Плотина Poirée. Расчетъ спицъ.

Разсмотримъ вертикально стоящую спицу, имѣющую двѣ опорныя точки, при чемъ разстояніе между ними обозначимъ черезъ h. Примемъ далѣе, что подпорный горизонтъ возвышается до верхней опорной точки, и что съ низовой стороны спица не испытываетъ никакого давленія,

Полное давленіе, испытываемое спицей, будетъ $\frac{1000\lambda h^2}{2}$, гдѣ λ—толщина спицы въ направленіи перпендикулярномъ къ теченію.

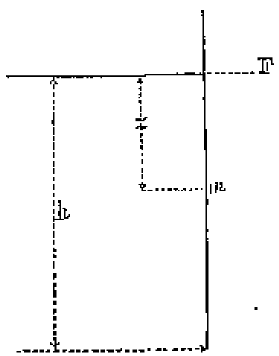
Моментъ этого давленія относительно нижней опорной точки равенъ $\frac{1000\lambda h^3}{6}$.

Реакція F въ верхней опорной точкѣ равна $\frac{1000\lambda h^2}{6}$.

*) Въ „Курсѣ внутреннихъ водяныхъ сообщеній" проф. Θ. Г. Зброжека имѣется довольно подробное описаніе конструкціи плотинъ Poirée, Chanoine'a и Desfontaines'a, а потому мы, не останавливаясь на этомъ вопросѣ, предполагаемъ, что читатель всегда можетъ обратиться къ указанному курсу.

Изгибающій моментъ въ сѣченіи m, лежащемъ на глубинѣ z отъ подпорнаго горизонта, выразится такъ:

$$M = \frac{1000\lambda h^2}{6} \cdot z - \frac{1000\lambda z^2}{2} \cdot \frac{z}{3} = \frac{1000\lambda z}{6}(h^2 - z^2) \ldots (A)$$



Чер. 15.

Чтобы найти maximum этого момента, приравняемъ нулю производную уравненія (A); получимъ:

$$h^2 - 3z^2 = 0, \quad \text{откуда} \quad z = \frac{h}{\sqrt{3}}$$

Подставивъ это значеніе z въ уравненіе (A), получимъ искомый maximum:

$$M = \frac{1000\lambda h^3}{9\sqrt{3}}.$$

Такъ какъ спица имѣетъ квадратное сѣченіе съ стороною λ, то моментъ инерціи его равенъ $\frac{\lambda^4}{12}$.

Условіе прочности спицы поэтому будетъ:

$$R = \frac{Ma}{J} = \frac{1000\lambda h^3}{9\sqrt{3}} \cdot \frac{6}{\lambda^3} = \frac{2000 h^3}{3\sqrt{3}\lambda^2}.$$

Такъ какъ вѣсъ спицъ для возможности легкихъ съ ними маневровъ вручную не долженъ превосходить извѣстнаго предѣла, около 50 фунтовъ, то само собой становится очевиднымъ, почему спицевыя загражденія устраиваются только при небольшихъ подпорахъ, не свыше 3 метровъ.

Водонепроницаемость спицевого загражденія.

Къ числу весьма крупныхъ недостатковъ спицевого загражденія слѣдуетъ отнести его недостаточную водонепроницаемость, что въ рѣкахъ съ небольшимъ расходомъ представляетъ большое неудобство, такъ какъ иногда благодаря этому оказывается невозможнымъ удержать подпорный горизонтъ на проектной высотѣ.

Въ самомъ дѣлѣ, обозначимъ черезъ

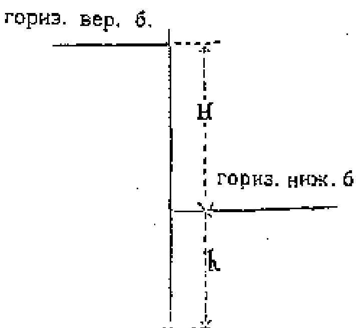
l—ширину щели между двумя спицами, стоящими вертикально,

h—высоту горизонта нижняго бьефа надъ флюдбетомъ,

H—высоту подпора,

q—расходъ черезъ разсматриваемую щель,

m—коэффиціентъ сжатія для отверстія въ тонкой стѣнкѣ съ насадкой.



Чер. 16.

Если мы разсмотримъ элементарную часть щели dx, находящуюся на глубинѣ x отъ подпорнаго горизонта (но выше горизонта нижняго бьефа), то увидимъ, что расходъ черезъ нее равенъ $mldx\sqrt{2gx}$.

Часть щели, расположенная ниже горизонта нижняго бьефа, дастъ расходъ равный $mlh\sqrt{2gH}$.

Такимъ образомъ полный расходъ черезъ разсматриваемую щель оказывается равнымъ:

$$q = ml\int_0^H \sqrt{2gx}\,dx + mlh\sqrt{2gH} = ml\sqrt{2gH}\left(\frac{2}{3}H + h\right).$$

Если обозначить черезъ λ ширину спицы, то на погонный метръ спицевого загражденія окажется $\frac{1}{l+\lambda}$ щелей, а потому полный расходъ черезъ щели на каждый погонный метръ его равенъ:

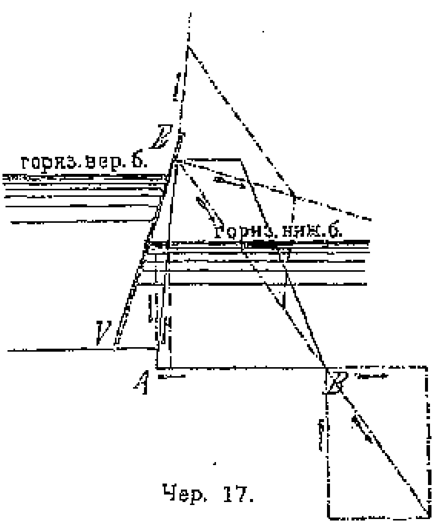
$$q_1 = \frac{ml}{l+\lambda}\sqrt{2gH}\left(\frac{2}{3}H+h\right).$$

Иногда эта потеря расхода черезъ щели можетъ оказаться больше меженняго расхода, результатомъ чего является невозможность удержать подпорный горизонтъ на проектной высотѣ, а потому желательно во всѣхъ случаяхъ спицевого загражденія дѣлать вышеуказанную повѣрку.

Переходя къ разсмотрѣнію усилій, дѣйствующихъ въ самой фермѣ Poirée, мы должны разобрать два различныхъ случая: одинъ, когда затворами для плотины служатъ спицы, другой, когда для той же цѣли служатъ щиты Boulé или шторы Caméré.

Распредѣленіе усилій въ частяхъ фермы Poirée въ случаѣ спицевого загражденія.

При спицевомъ загражденіи ферму можно разсматривать какъ балку, одинъ конецъ которой закрѣпленъ, а на другой свободный дѣйствуетъ сила въ точкѣ E—верхней опорѣ спицъ. Сила эта, нормальная къ направленію спицъ, въ точкѣ E разлагается по двумъ направленіямъ—въ стороны опорныхъ точекъ A и B. Изъ чертежа 17 ясно, что по направленію EA дѣйствуетъ растяженіе, а по направленію EB—сжатіе. Далѣе, эти силы черезъ щипы и подшипники передаются флюдбету, при чемъ вновь разлагаются на горизонтальныя и вертикальныя составляющія.



Чер. 17.

Горизонтальныя силы складываются и сдвигаютъ ферму въ сторону нижняго бьефа. Вертикальныя дѣйствуютъ въ обратныя стороны: верховая стремится поднять подферменные камни, а низовая раздробить ихъ.

Примемъ для дальнѣйшихъ выводовъ слѣдующія обозначенія:

H—высота фермы, считая ее отъ нижней оси до верхней упорной связи, на которую опираются спицы.

m—углубленіе флюдбета, въ которое складываются фермы, при чемъ будемъ считать его отъ нижней опорной точки спицы до нижней оси фермы.

p и q—высоты горизонтовъ верхняго и нижняго бьефовъ надъ флюдбетомъ.

α—уголъ, подъ которымъ спицы наклонены къ вертикали.

β—уголъ, составляемый переднимъ ребромъ фермы съ вертикалью.

γ—уголъ, составляемый діагональю фермы EB съ вертикалью.

Полное давленіе, испытываемое спицей, очевидно, равно (чер, 18)

$$\frac{p^2-q^2}{2\cos\alpha}$$

Моментъ этого давленія относительно нижней опорной точки спицы будетъ:

$$\frac{p^2}{2\cos\alpha}\cdot\frac{p}{3\cos\alpha}-\frac{q^2}{2\cos\alpha}\cdot\frac{q}{3\cos\alpha}=\frac{p^3-q^3}{6\cos^2\alpha}.$$

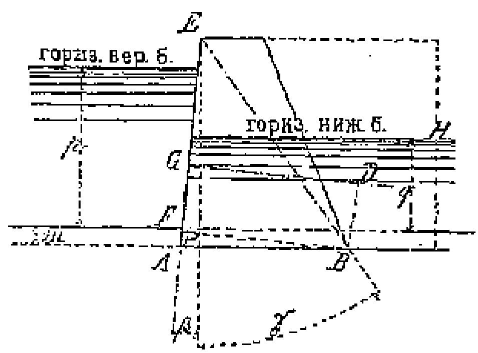
Дѣля его на полное давленіе, получаемъ точку приложенія этого послѣдняго, или такъ называемый „центръ давленія", а именно, разстояніе этой точки отъ нижней опорной точки спицы будетъ:

$$\frac{p^3-q^3}{2\cos\alpha}\cdot\frac{2\cos\alpha}{p^2-q^2}=\frac{p^3-q^3}{3\cos\alpha(p^2-q^2)}=\frac{p^2+pq+q^2}{3(p+q)\cos\alpha}.$$

Чтобы найти давленіе, передающееся въ точкѣ E, дѣлимъ полный моментъ $\frac{p^3-q^3}{6\cos^2\alpha}$ на длину спицы, равную $\frac{H-m}{\cos\alpha}$, и въ результатѣ получимъ искомое давленіе:

$$\frac{p^3-q^3}{6\cos^2\alpha}\cdot\frac{\cos\alpha}{H-m}=\frac{p^3-q^3}{6(H-m)\cos^2\alpha}=\varphi.$$

Посмотримъ теперь, какое дѣйствіе произведетъ эта сила φ на ферму.



Чер. 18.

Взявъ моменты силы φ и вызываемыхъ ею опорныхъ реакцій относительно точки A, получимъ для вертикальной реакціи въ точкѣ B выраженіе $\frac{\varphi . AG}{AB}$, но $AB = H(tg\beta + tg\gamma)$.

Съ другой стороны $AG = CE - CI$; $CE = \frac{H}{cos\alpha}$; $CI = AC\ sin\alpha$; $AC = H(tg\alpha - tg\beta)$.

Такимъ образомъ:

$$AG = \frac{H}{cos\alpha}\left[1 - sin\alpha \cdot cos\alpha(tg\alpha - tg\beta)\right],$$

и вертикальная реакція въ точкѣ B выразится слѣдующимъ образомъ:

$$\text{верт. реакція} = \frac{(p^3 - q^3)\left[1 - sin\alpha\ cos\alpha(tg\alpha - tg\beta)\right]}{6\,(H - m)\,cos^2\alpha\,(tg\beta + tg\gamma)} \ldots (1)$$

Эту силу и слѣдуетъ принимать въ расчетъ при повѣркѣ прочности низового шипа и подшипника.

Чтобы найти вертикальное, вырывающее усиліе въ точкѣ A, возьмемъ моменты относительно точки B; получимъ:

вырывающее усиліе въ точкѣ $A = \frac{\varphi . BK}{AB}$, но $BK = CE - CD$; $CE = \frac{H}{cos\alpha}$; $CD = CB\ sin\alpha$; $CB = H(tg\alpha + tg\gamma)$. Такимъ образомъ:

$$BK = \frac{H}{cos\alpha}\left[1 - sin\alpha\ cos\alpha(tg\alpha + tg\gamma)\right].$$

и вырывающее усиліе $=\frac{(p^3-q^3)[1-sin\alpha\, cos\alpha(tg\alpha+tg\gamma)}{6\ (H-m)\ cos^2\alpha\,(tg\beta+gt\gamma)}$ ...(2)

Эту послѣднюю силу слѣдуетъ принимать въ расчетъ при повѣркѣ прочности верхового шипа и подшипника, а также и подферменнаго камня на вырываніе изъ остальной массы кладки.

Чтобы получить величину сжимающаго усилія по направленію EB, достаточно выраженіе (1) раздѣлить на $cos\gamma$.

Выраженіе (1), дѣленное на $cos\ \beta$, дастъ величину растягивающаго усилія по направленію FA.

Формулы (1) и (2) значительно упростятся, если въ нихъ положить $\beta=0$, т. е. принять, что переднее ребро фермы—вертикально. Тогда получимъ:

вертик. реакція въ $B=\frac{p^3-q^3}{6\,(H-m)\ tg\gamma}$ . . . . (1').

вырывающее усиліе въ $A=$

$$=\frac{(p^3-q^3)\ [1-sin\alpha\ cos\alpha\ (tg\alpha+tg\gamma)]}{6\ (H-m)\ cos^2\alpha\ tg\gamma}\ .\ .\ .\ .\ .\ (2').$$

Если углы α и γ—дополнительные, то $tg\alpha\ tg\gamma=$ $=1$ или $cos\alpha=sin\alpha\cdot tg\gamma$, а слѣдовательно выраженіе (2') обратится въ нуль, а выраженіе для сжимающаго усилія по діаганали EB обратится въ слѣдующее:

$$\frac{(p^3-q^3)}{6\,(H-m)\,sin\gamma}\ \text{или}\ \frac{(p^3-q^3)}{6\,(H-m)\,cos\alpha}.$$

То есть мы получили, что усиліе φ въ этомъ случаѣ передается полностью по направленію діаганали EB.

Распредѣленіе усилій въ частяхъ фермы Poirée въ случаѣ, когда затворами служать щиты Boulé или шторы Caméré.

Когда затворами для плотинъ Poгée служатъ щиты Boulé или шторы Caméré, фермы находятся въ болѣе неблагопріятныхъ условіяхъ, чѣмъ, въ предыдущемъ случаѣ: здѣсь уже все давленіе воды передается на ферму, и переднее ребро ея, подверженное непосредственному давленію воды, кромѣ растягивающаго усилія получаетъ еще мѣстный изгибъ, а потому вообще фермы въ этомъ случаѣ должны быть гораздо солиднѣе.

Сохраняя прежнія обозначенія, находимъ, что въ разсматриваемомъ случаѣ полное давленіе воды на ферму равно $\frac{p^2-q^2}{2\ cos\beta}=\varphi_1$.

Чтобы найти вертикальную реакцію въ точкѣ B, возьмемъ, какъ и прежде, моменты силъ относительно точки A, получимъ (чер. 19):

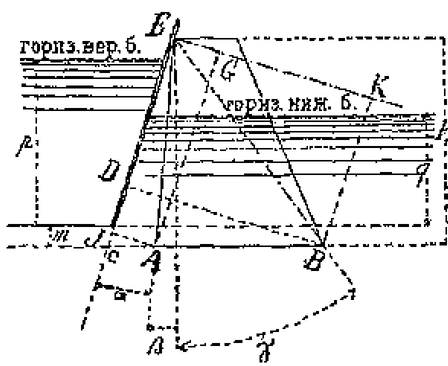
вертикальная реакція въ $B=\frac{\varphi_1 \cdot AG}{AB}$.

$$\text{Но } AG=FG+\frac{m}{cos\beta}=\frac{p^2+pq+q^2}{3\ (p+q)\ cos\beta}+\frac{m}{cos\beta}=$$

$$=\frac{p^2+pq+q^2+3\ mp+3\ mq}{3\ (p+q)\ cos\beta}$$

$$\varphi_1 \cdot AG=\frac{p^3-q^3+3m\ (p^2-q^2)}{6\ cos^2\beta}$$

$AB=H\ (tg\beta+tg\gamma)$, а потому вертикал. реакція въ $B=\frac{p^3-q^3+3m\ (p^2-q^2)}{6H\ (tg\beta+tg\gamma)\ cos^2\beta}$ . . . . (3).



Чер. 19.

Сжимающее усиліе по направленію діагонали EB получится, очевидно, изъ выраженія (3) черезъ дѣленіе его на $cos\gamma$.

Вырывающее усиліе въ A находится такъже какъ и прежде; получимъ:

вырывающее усиліе въ $A=\frac{\varphi_1 \cdot BD}{AB}$,

$$\text{но } \varphi_1 \cdot BD=\varphi_1 \cdot AG-\varphi_1 \cdot AP;\ AP=AB\ sin\beta=$$

$$=H\ (tg\beta+tg\gamma)\ sin\beta.$$

$$\varphi_1 \cdot AP=\frac{p^2-q^2}{2\ cos\beta}\ H\,(tg\beta+tg\gamma)\,sin\beta.$$

Итакъ вырывающее усиліе въ $A =$

$$= \frac{p^3 - q^3 + 3\ m\ (p^2 - q^2)}{6\ cos^2\beta.\ H\ (tg\beta + tg\gamma)} - \frac{p^2 - q^2}{2} tg\beta \quad . \ . \ . \ . \ (4).$$

Выраженіе (4) показываетъ, что вырывающее усиліе равно сжимающему (тоже вертикальному) за вычетомъ величины $\frac{p^2 - q^2}{2} tg\beta$.

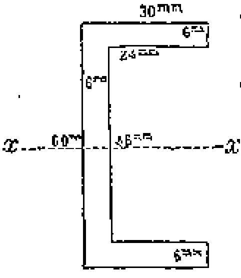
При $\beta = 0$ оба усилія становятся равными между собой, причемъ величина каждаго изъ нихъ будетъ:

$$\frac{p^3 - q^3 + 3\ m\ (p^2 - q^2)}{6\ H\ tg\gamma}.$$

Сопротивленіе фермы въ поперечномъ направленіи.

Всѣ вышеприведенные расчеты справедливы только въ томъ случаѣ, если ферма подъ вліяніемъ подпора не коробится и не перекашивается, а потому во избѣжаніе этихъ явленій ферма должна обладать достаточнымъ сопротивленіемъ въ поперечномъ направленіи, перпендикулярномъ къ плоскости дѣйствія только что разсмотрѣнныхъ силъ.

Соблюденіе этого условія необходимо еще по другимъ причинамъ: во время маневровъ, связанныхъ съ поднятіемъ или опусканіемъ фермы, эта послѣдняя находится въ условіяхъ балки, лежащей на двухъ опорахъ и подверженной дѣйствію собственнаго вѣса.



Чер. 20.

Для бо́льшей наглядности разсмотримъ ферму судоходнаго отверстія на рѣкѣ Saône'ѣ.

Ребра ея имѣютъ корытообразное сѣченіе съ размѣрами $\frac{60^{mm} \times 30^{mm}}{6^{\ mm}}$ (чер. 20).

Моментъ инерціи этого сѣченія относительно оси XX равенъ:

$$J_{xx} = \frac{0{,}03.0{,}06^3 - 0{,}024.0{,}048^3}{12} = 0{,}000000319^{m4}.$$

Вѣсъ погоннаго метра ребра равенъ:

$$p = (0{,}060 + 0{,}048)\ 0{,}006 . 7800 = 0{,}000648 . 7800 =$$
$$= 5{,}1 \text{ килогр.}$$

Длина каждаго ребра равна 4 метрамъ.

Такимъ образомъ, если ребро фермы разсматривать какъ балку, свободно лежащую на двухъ опорахъ, то наибольшій прогибъ ея выразится такъ:

$$f = \frac{5}{384} \frac{pl^4}{EJ} = \frac{5 . 5{,}1 . 256}{384 . 2000000000 . 0{,}000000319} =$$
$$= 0{,}00264 \text{ метра.}$$

Наибольшее напряженіе матеріала получится по формулѣ:

$$R = \frac{Mz}{J} = \frac{pl^2}{8} \cdot \frac{0{,}03}{0{,}000000319} = 0{,}9 \frac{\text{кил.}}{\text{мм}^2}.$$

Но на ребра передается кромѣ того вѣсъ поперечинъ. Въ виду затруднительности точно опредѣлить вліяніе этой добавочной нагрузки, можно съ запасомъ принять, что какъ прогибъ, такъ и напряженіе ребра отъ этого удваиваются, такъ что въ разсматриваемомъ случаѣ слѣдуетъ принять наибольшій прогибъ f равнымъ 0,00528 метра, а наибольшее напряженіе R равнымъ $1{,}8 \frac{\text{кил.}}{\text{мм}^2}$. Напряженіе это, само по себѣ небольшое, въ данномъ случаѣ при частыхъ толчкахъ и сотрясеніяхъ, которымъ неизбѣжно подвергается ферма при маневрахъ, пріобрѣтаетъ гораздо бо́льшее значеніе, а потому ферма должна непремѣнно состоять изъ солидной жесткой рамы, способной выдержать всевозможные удары безъ замѣтныхъ въ ней деформацій

Но здѣсь возникаетъ другое неудобство: такъ какъ фермы при опусканіи ложатся одна на другую, то, чѣмъ онѣ толще, тѣмъ больше приходится дѣлать углубленіе въ флюдбетѣ, а слѣдовательно увеличивать ихъ высоту при томъ-же подпорѣ; увеличеніе высоты влечетъ за собой и увеличеніе вѣса, а слѣдовательно и напряженій при опусканіи и поднятіи, не говоря уже о затруднительности маневровъ съ ними. Въ виду такихъ противорѣчивыхъ требованій лучше всего пользоваться типами уже существующихъ фермъ и только повѣрять ихъ на прочность въ каждомъ частномъ случаѣ.

Щиты Chanoine'а въ примѣненіи ихъ къ судоходнымъ отверстіямъ.

Не останавливаясь на конструкціи щитовъ Chanoine'а, мы постараемся выяснить только наиболѣе важные вопросы, связанные съ проектированіемъ этой системы для закрытія судоходныхъ отверстій и водосливовъ.

Разсмотримъ сначала примѣненіе щитовъ Chanoine'а къ судоходнымъ отверстіямъ.

Высота гребня щитовъ.

Когда щиты стоятъ, то верхъ ихъ долженъ доходить до подпорнаго горизонта. Въ самомъ дѣлѣ, если-бы мы сдѣлали ихъ выше, то безъ всякой пользы увеличили бы размѣры подъемныхъ механизмовъ; если-бы мы сдѣлали ихъ ниже, то черезъ гребень ихъ постоянно переливался-бы слой воды, который не только подмывалъ-бы флюдбетъ, но и могъ-бы стѣснять подходъ судовъ съ низовой стороны плотины къ шлюзу; кромѣ того, въ случаѣ утилизаціи водослива для промышленныхъ цѣлей, получалась-бы потеря движущей силы.

Сосѣдніе щиты не должны плотно примыкать одинъ къ другому: зазоръ между ними долженъ быть хотя-бы уже потому, что при полномъ примыканіи малѣйшее искривленіе одного щита сдѣлало-бы затруднительными маневры съ сосѣдними щитами. Обыкновенно зазоры эти дѣлаютъ съ такимъ расчетомъ, чтобы сумма расходовъ черезъ нихъ была-бы немногимъ меньше меженняго расхода рѣки.

Такъ въ плотинахъ Верхней Сены каждый промежутокъ сдѣланъ въ 0,10 метр. ширины, а на Іоннѣ въ 0,05 метра.

Въ случаѣ, если-бы оказалось, что принятые промежутки слишкомъ велики, такъ что пропускаютъ расходъ больше меженняго, ихъ можно уменьшить, набивши вдоль щитовъ съ каждой стороны планки.

Для опредѣленія расхода промежутковъ можно воспользоваться пріемомъ, который былъ примѣненъ при разсмотрѣніи вопроса о водопроницаемости спицевого загражденія.

Ширина щитовъ.

Ширина щита до извѣстной степени произвольна и зависитъ какъ отъ принятой конструкціи, такъ и отъ подъемной силы, которой можно располагать при маневрахъ.

На Верхней Сенѣ

щитамъ въ 2 метра высоты давали ширину въ 1,30 метра

" " 3 " " " " " 1,20 "

" " 3,83" " " " " 1,00 "

На Saône'ѣ

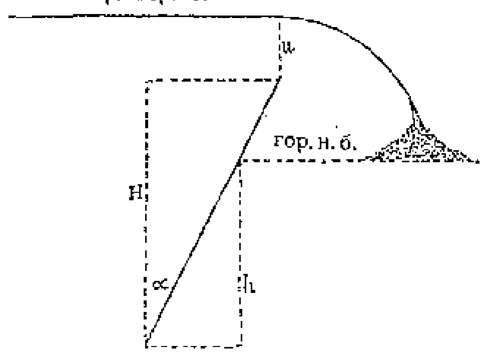
щитамъ въ 3,62 мет. длины давали ширину въ 1,10 метра.

Такимъ образомъ мы видимъ, что ширину уменьшали съ увеличеніемъ высоты, конечно для того, чтобы умѣрить статическое на щиты давленіе, пропорціональное произведенію ширины щита на квадратъ его высоты.

Положеніе оси вращенія щита.

Щиты судоходныхъ отверстій никогда не должны вращаться сами собою при повышеніи горизонта. Такое ихъ вращеніе можетъ повлечь за собою очень много печальныхъ и нежелательныхъ послѣдствій: верхній бьефъ можетъ обмелѣть, а нижній наводниться; можетъ образоваться сильное теченіе, которое подхватитъ идущія суда и разобьетъ ихъ о плотину; сильный потокъ воды можетъ отбросить къ плотинѣ лежащіе на днѣ верхняго бьефа отдѣльные камни или другіе предметы; эти послѣдніе, остановившись около стоекъ рамы щита, помѣшаютъ затѣмъ опустить щитъ въ стоячее положеніе.

Всего этого можно избѣжать, расположивъ приличнымъ образомъ ось вращенія щита.



Чер. 21.

Разсмотримъ отдѣльный щитъ въ стоячемъ положеніи, причемъ обозначимъ черезъ:

H — его вертикальную проекцію,

α — уголъ, составляемый имъ съ вертикалью,

u — толщину волны, переливающейся черезъ его гребень,

h — высоту горизонта нижняго бьефа надъ подошвой щита.

Давленіе на одинъ погонный метръ на поверхность щита съ верховой стороны, очевидно, равно (чер. 21):

$$P = \frac{1000}{2\cos\alpha} H\,(H + 2u).$$

Моментъ этого давленія относительно подошвы щита равенъ:

$$M = \frac{1000}{6\cos^2\alpha} H^2\,(H + 3u).$$

Давленіе съ низовой стороны на ту же ширину щита равно:

$$P' = \frac{1000}{2\cos\alpha}\, h^2.$$

Моментъ этого давленія относительно подошвы щита будетъ:

$$M' = \frac{1000}{6\cos^2\alpha}\, h^3.$$

Равнодѣйствующая давленій съ верховой и низовой стороны будетъ:

$$P - P' = \frac{1000}{2cos\alpha}\left[H(H + 2u) - h^2\right].$$

Разстояніе точки приложенія этой равнодѣйствующей отъ подошвы щита будетъ:

$$\Delta = \frac{M - M'}{P - P'} = \frac{1}{3cos\alpha} \cdot \frac{H^2(H + 3u) - h^3}{H(H + 2u) - h^2}.$$

Такимъ образомъ, для того чтобы не могло произойти произвольное вращеніе щитовъ, ось вращенія ихъ должна отстоять отъ подошвы ихъ на разстояніи по крайней мѣрѣ равномъ найденной величинѣ Δ.

Казалось-бы, что вопросъ рѣшенъ, но на практикѣ возникаетъ большое затрудненіе въ опредѣленіи точной величины h и u.

Въ самомъ дѣлѣ, достаточно сдѣлать одинъ значительный пропускъ воды черезъ плотину, чтобы хотя на нѣсколько минутъ произвести повышеніе горизонта съ низовой стороны плотины.

Что касается до величины u, то нельзя не сознаться, что, какъ бы аккуратно ни было расчитано отверстіе регулирующаго водослива, не можетъ быть дано полной гарантіи, что толщина слоя протекающей черезъ него воды никогда не превзойдетъ наибольшую расчетную величину.

Въ виду такой неопредѣленности вопроса Lagrené совѣтуетъ давать h наибольшое значеніе, которое оно вообще можетъ имѣть, т. е. принять $h = H$.

Тогда выраженіе для Δ обратится въ слѣдующее:

$$\Delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{H}{cos\alpha}.$$

Другими словами, въ этомъ случаѣ, каково бы ни было u, равнодѣйствующая давленій съ верховой и низовой стороны всегда проходитъ черезъ средину щита. На этой высотѣ Lagrené и рекомендуетъ располагать ось вращенія щита въ судоходныхъ отверстіяхъ, подтверждая свой совѣтъ ссылкой на плотины на рѣкахъ Верхней Сенѣ, Іоннѣ и Марнѣ, гдѣ обнаружилась на практикѣ необходимость этого условія, такъ какъ возвышеніе оси вращенія въ $\frac{5}{12}$ длины щита оказалось недостаточнымъ.

Наклонъ щита. Когда щитъ стоитъ, упираясь своей нижней частью въ порогъ, онъ производитъ сжимающее усиліе на подкосъ и вытягивающее усиліе на раму. Эти два усилія измѣняются въ зависимости отъ угла, составляемаго щитомъ съ вертикалью. Точно также отъ этого угла зависитъ и давленіе, испытываемое какъ самимъ щитомъ, такъ и отдѣльными его частями.

Поэтому необходимо выяснить, при какомъ углѣ происходитъ наиболѣе выгодное распредѣленіе усилій.

Обозначимъ черезъ

α — уголъ, составляемый щитомъ съ вертикалью въ стоячемъ положеніи,

β — уголъ, составляемый подкосомъ съ вертикалью при томъ-же положеніи щита,

H — вертикальную проекцію щита въ стоячемъ положеніи,

l — длину щита равную $\frac{H}{\cos\alpha}$,

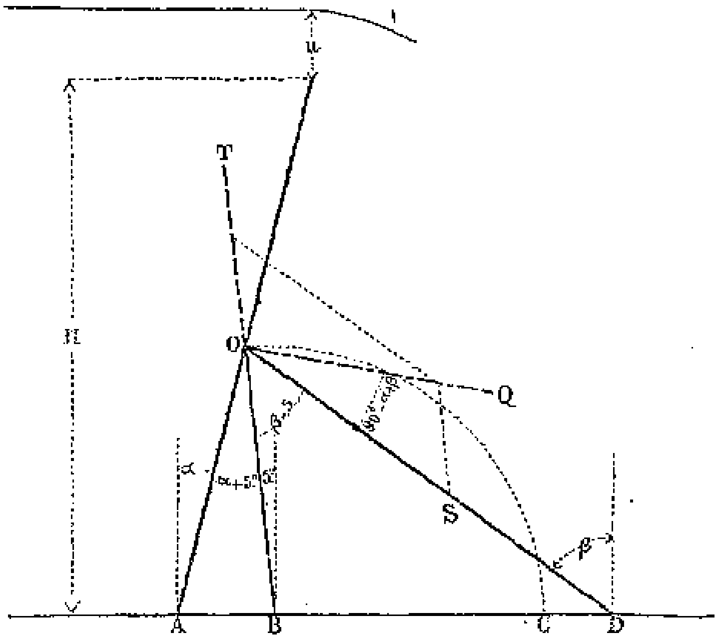
Q — нормальное къ плоскости щита давленіе, передающееся черезъ ось вращенія щита,

S — составляющую давленія Q по направленію подкоса OD,

T — составляющую давленія Q, дѣйствующую въ плоскости рамы OB,

u — толщину переливающейся волны (чер. 22).

Разсмотримъ невыгоднѣйшій случай, когда щитъ не испытываетъ съ низовой стороны никакого давленія. Чтобы получить выраженіе момента полнаго давленія на щитъ относительно подошвы его A, достаточно въ приведенномъ выше выраженіи:



Чер. 22.

$$M - M' = \frac{1000}{6\cos^2\alpha}\left[H^2\,(H+3u) - h^3\right]$$

принять $h = 0$, тогда получимъ:

$$\frac{1000}{6\cos^2\alpha}H^2\,(H+3u).$$

Если ось вращенія щита помѣщена на срединѣ его длины, давленіе Q выразится такъ:

$$Q = \frac{2}{l}\cdot\frac{1000}{6\cos^2\alpha}\,H^2\,(H+3u) = \frac{2\cos\alpha}{H}\,\frac{1000}{6\cos^2\alpha}H^2\,(H+3u),$$

или

$$Q = \frac{1000}{3\cos\alpha}\,H\,(H+3u).$$

Рама OB въ стоячемъ положеніи обыкновенно составляетъ съ вертикалью уголъ въ 5° въ сторону верхняго бьефа. Дѣлается это для облегченія установки подкоса во время закрытія плотины, такъ какъ въ этомъ случаѣ центръ тяжести щита окажется выше по теченію нижней оси B вращенія рамы.

Величины AB и OB выразимъ черезъ α и H, получимъ:

$$AB = \frac{H}{2} \cdot \frac{Sin\,(\alpha + 5^\circ)}{cos\alpha\ cos 5^\circ} \text{ и } OB = \frac{H}{2\,cos 5^\circ}.$$

Величина BD опредѣляется такъ: отложимъ сначала отъ точки B величину $BC = OB$; на этомъ разстояніи ляжетъ рама, когда щитъ уложенъ на флюдбетъ; откладываемъ затѣмъ отъ точки C разстояніе около 0,50—0,60 метра для помѣщенія рейки съ пятками, получимъ точку D — начало упорной коробки и точку опоры подкоса. Если длину CD обозначимъ черезъ b, то получимъ:

$$OB = \frac{H}{2\,cos 5^\circ};\ BD = \frac{H}{2\,cos\,5^\circ} + b.$$

Кромѣ того имѣемъ:

$$\frac{OB}{BD} = \frac{cos\ \beta}{Sin\ (\beta - 5^\circ)},$$

или

$$tg\beta = \frac{1}{cos\,5^\circ} + tg\,5^\circ + \frac{2b}{H}.$$

Замѣтимъ далѣе, что, если мы предположимъ, что уголъ α измѣняется такъ, что проекція щита H остается постоянной, и точка A остается на томъ-же мѣстѣ, то треугольникъ BOD не измѣнится, но только перемѣстится параллельно самому себѣ, скользя по основанію AD.

Отсюда слѣдуетъ, что, когда даны высота подпора H и высота оси вращенія $\frac{H}{2}$, то этимъ самымъ даны уже наклонъ и длина, какъ рамы, такъ и подкоса, и вмѣстѣ съ угломъ α измѣняются только длина щита l и толщина порога AB.

Обратимся теперь къ давленію Q и найдемъ выраженія его составляющихъ S и T; получимъ:

$$S = Q\,\frac{\cos(\alpha + 5^\circ)}{\sin(\beta - 5^\circ)},\quad T = Q\,\frac{\cos(\alpha + \beta)}{\sin(\beta - 5^\circ)}.$$

Вставляя въ эти выраженія вмѣсто Q найденную выше его величину, получимъ:

$$S = \frac{1000\,H\,(H + 3u)}{3\,\sin(\beta - 5^\circ)} \cdot \frac{\cos(\alpha + 5^\circ)}{\cos\alpha}$$

$$T = \frac{1000\,H\,(H + 3u)}{3\,\sin(\beta - 5^\circ)} \cdot \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos\alpha}.$$

Въ обоихъ этихъ выраженіяхъ перемѣнной является только α, при чемъ maximum T и S, очевидно, имѣетъ мѣсто при $\alpha = 0$. При увеличеніи α величины T и S сначала уменьшаются до 0, потомъ становятся отрицательными и наконецъ при $\alpha = 90^\circ$ обращаются въ безконечность.

Вырывающая сила T, дѣйствующая въ плоскости рамы, равна нулю, когда $\alpha + \beta = 90$, или $\alpha = 90^\circ - \beta$; въ этомъ случаѣ подкосъ нормаленъ къ щиту, и въ рамѣ не обнаруживается никакого вытягивающаго напряженія, но зато длина $l = \frac{H}{\cos\alpha}$ получается очень большой, а это нежелательно, такъ какъ придется имѣть дѣло съ очень длинными ребрами щита, подверженными значительному давленію.

Чтобы ознакомиться лучше съ этимъ вопросомъ, возьмемъ численный примѣръ.

Выше мы имѣли выраженіе

$$tg\beta = tg5^\circ + \frac{1}{\cos 5^\circ} + \frac{2b}{H} = 1{,}092 + \frac{2b}{H}.$$

Примемъ $H = 3{,}60$ метра и $b = 0{,}50$ метра; получимъ

$$tg\beta = 1{,}369 \text{ и } \beta = \text{около } 53^\circ.$$

Еслибы $\alpha = 90 - \beta$, то α былъ бы равенъ 37°, и длина щита была-бы $l = \frac{H}{\cos\alpha} = \frac{3,60}{0,7986} = 4,507$ метра, а свѣшивающейся части $\frac{l}{2} = 2,253$ метра, между тѣмъ какъ при $\alpha = 20^\circ$ получимъ $l = 3,83$ метр. и $\frac{l}{2} = 1,915$ метра.

Трудно дать общее правило для выбора α. Выборъ этотъ является до извѣстной степени произвольнымъ. Хорошiе сравнительно результаты получаются, если α давать значенiе, равное половинѣ того, при которомъ $T = 0$.

Полезно въ каждомъ частномъ случаѣ составлять таблицу численныхъ значенiй количествъ l, Q, s и T для различныхъ значенiй α отъ 0 до $90^\circ - \beta$ и изслѣдовать, какъ они измѣняются. Таблица эта можетъ быть составлена слѣдующимъ образомъ.

Уголъ α	Длина щита $l = \frac{H}{\cos\alpha}$	$Q = \frac{1000H(H+3u)}{3\cos\alpha}$	$S = \frac{1000H(H+3u)}{3\sin(\beta-5^\circ)} \cdot \frac{\cos(\alpha+5^\circ)}{\cos\alpha}$	$T = \frac{1000H(H+3u)}{3\sin(\beta-5^\circ)} \cdot \frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\alpha}$	Максим. моментъ въ свѣшив. части: $M = \frac{1000\,H^2\left(\frac{H}{2}+3u\right)}{24\cos^2\alpha}$	Замѣчанiя относительно принятыхъ въ таблицѣ формулъ.
0°						Расчетъ ведется на ширину щита въ 1 мет.; ось вращенiя расположена по срединѣ щита, и рама стоитъ подъ уг. въ 5° къ вертик.
5°						
10°						
15°						
}						
$90^\circ - \beta$						

Щиты Chanoine'a въ примѣненіи къ водосливнымъ отверстіямъ.

Въ примѣненіи къ водосливнымъ отверстіямъ Chanoine хотѣлъ сдѣлать свою систему вполнѣ самодѣйствующей, т. е. щиты должны были не только сами собой открываться для пропуска паводка, но и сами же собой закрываться при извѣстномъ пониженіи подпорнаго горизонта. Для этой цѣли онъ прибѣгнулъ къ удержной цѣпи и устроилъ на щитѣ въ нижней его части противовѣсъ. Но надежды его не оправдались: щиты, которые должны были по его расчету вернуться въ стоячее положеніе при пониженіи подпорнаго горизонта на 0,15 метра, приходили въ это положеніе только при пониженіе въ 1 метръ.

Lagrené, работавшій надъ этимъ вопросомъ вмѣстѣ съ Chanoine'омъ, пришелъ къ заключенію, что лучше отказаться отъ этой мысли, тѣмъ болѣе, что щиты, удерживаемые цѣпью, значительно стѣсняютъ водосливное отверстіе, а въ случаѣ перерыва цѣпи совершенно опрокидываются на флюдбетъ, и сквозь образовавшееся отверстіе прорывается потокъ, могущій произвести крайне разрушительное дѣйствіе съ низовой стороны плотины.

Гораздо лучше по его мнѣнію устраивать передъ водосливомъ служебный мостикъ на фермахъ Poirée, съ котораго и производить всѣ необходимые маневры.

Такимъ образомъ, щитъ водосливнаго отверстія долженъ будетъ удовлетворять только одному условію—автоматически открываться при повышеніи подпорнаго горизонта на опредѣленную величину на случай недосмотра шлюзовой прислуги; установка-же его въ стоячее положеніе производится съ служебнаго мостика.

Гребень щитовъ по мнѣнію Lagrené лучше располагать въ уровнѣ подпорнаго горизонта, конечно слѣдуетъ только сдѣлать повѣрку на водопроницаемость сквозь зазоры между щитами.

Положеніе оси вращенія щита.

Выше мы вывели для судоходныхъ отверстій формулу, дающую высоту оси надъ подошвой щита, а именно:

$$\Delta = \frac{1}{3\cos\alpha} \cdot \frac{H^2(H+3u)-h^3}{H(H+2u)-h^2}.$$

Если-бы величина h была вполнѣ опредѣленной, то формула эта вполнѣ рѣшала-бы вопросъ, т. е. для опредѣленной величины u давала-бы вполнѣ опредѣленную Δ, но мы выше уже указали на полную неопредѣленность величины h.

Ввиду этого обстоятельства является нѣкоторая неопредѣленность при выборѣ высоты оси вращенія щитовъ, и въ каждомъ частномъ случаѣ нужно обращать особенное вниманіе на мѣстныя условія.

Мы здѣсь приведемъ нѣкоторую попытку расчета, предложенную Lagrené; расчетъ этотъ, конечно, можетъ измѣниться въ зависимости отъ нѣкоторыхъ характерныхъ особенностей, присущихъ каждому потоку.

Дадимъ сначала h значеніе не самое большое, какое оно можетъ имѣть, а нѣкоторое среднее, нѣсколько бо́льшее высоты меженняго горизонта надъ подошвой щита. Опредѣлимъ затѣмъ положеніе оси вращенія щита съ тѣмъ условіемъ, чтобы онъ приходилъ въ вращеніе при нѣкоторомъ среднемъ значеніи u, и затѣмъ уже посмотримъ, каково должно быть значеніе u, чтобы щитъ началъ вращаться при крайнемъ значеніи h.

Послѣдняя повѣрка покажетъ намъ, можно-ли оставить ось вращенія на взятой нами высотѣ или же нужно ее передвинуть вверхъ или внизъ

Примемъ, что среднее значеніе $h = y$, высотѣ оси вращенія щита надъ его подошвой, а среднее значеніе u, при которомъ начинается вращеніе щита, равно $u = 0{,}10\,H$ (чер. 23).

Далѣе, замѣнимъ y черезъ Hx, гдѣ x есть отношеніе вертикальной проекціи нижней части щита къ такой-же проекціи всего щита.

При такихъ обозначеніяхъ вышеприведенное выраженіе Δ обратится въ слѣдующее:

$$3x = \frac{1{,}03 - x^3}{1{,}02 - x^2},$$

или

$$x^3 - 1{,}53x + 0{,}512 = 0,$$

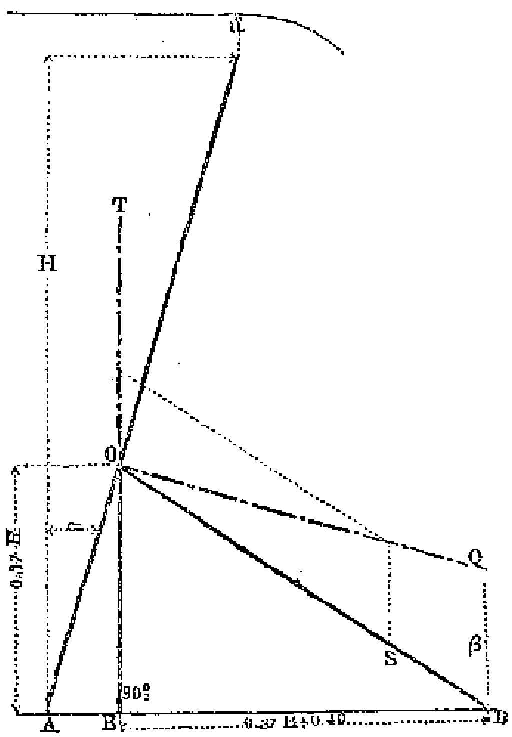
уравненіе, приблизительный корень котораго равенъ 0,37.

Итакъ получаемъ $y = 0{,}37H$.

Полученное значеніе y повѣряемъ для крайняго значенія h, а именно $h = 0$;

при $h = 0$ значеніе u находимъ изъ уравненія:

$$3.0{,}37H = \frac{H(H + 3u)}{H + 2u}.$$



Чер. 23.

Если найденное u допустимо, то и положеніе оси вращенія можно считать удовлетворительнымъ.

Перейдемъ теперь къ разсмотрѣнію вопроса о наклонѣ щита.

Наклонъ щита.

Обозначимъ черезъ α уголъ, составляемый щитомъ съ вертикалью.

Мы уже вывели раньше для щитовъ судоходнаго отверстія выраженіе момента верхового давленія на щитъ относительно его подошвы A, причемъ пренебрегали давленіемъ съ низовой стороны. Выраженіе это было:

$$\frac{1000}{9\cos^2\alpha} H^2 (H + 3u).$$

Такъ какъ длина нижней части щита AO равна $\frac{0{,}37H}{\cos\alpha}$, то нормальное давленіе на ось вращенія выразится такъ:

$$Q = \frac{1000}{2{,}22 \cos\alpha} H\ (H + 3u).$$

Если предположить, что рама—вертикальна, то составляющія S и T, дѣйствующія по подкосу и въ плоскости рамы, выразятся слѣдующимъ образомъ:

$$S = Q\frac{\cos\alpha}{\sin\beta} = \frac{1000}{2{,}22 \sin\beta} H\,(H + 3u).$$

$$T = Q\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\sin\beta} = \frac{1000 \cos(\alpha + \beta)}{2{,}22 \sin\beta \cos\alpha} H\,(H + 3u).$$

Для опредѣленія угла β замѣтимъ, что основаніе BD прямоугольнаго треугольника BOD должно равняться длинѣ OB рамы, увеличенной приблизительно на 0,40 метра для пропуска рейки съ пятками.

Слѣдовательно:

$$tg\,\beta = \frac{0{,}37\ H + 0{,}40}{0{,}37\ H}.$$

При $\alpha + \beta = 90^\circ$ вырывающее усиліе T обращается въ нуль, зато при такомъ α, какъ самъ щитъ, такъ и свѣшивающаяся его часть, получаются слишкомъ длинными, чего слѣдуетъ избѣгать.

По мнѣнію Lagrené α слѣдуетъ давать такъ-же, какъ и въ судоходныхъ отверстіяхъ, значеніе, равное половинѣ того при которомъ $T = 0$.

То есть брать:

$$\alpha = \frac{1}{2}(90^\circ - \beta).$$

Щиты Chanoin'a, конечно, вслѣдствіе разнообразія ихъ размѣровъ имѣютъ и нѣсколько разнообразную конструкцію, которая впрочемъ въ основныхъ чертахъ довольно однообразна: каждый щитъ состоитъ изъ двухъ или четырехъ длинныхъ деревянныхъ реберъ, соединенныхъ четырьмя деревянными же поперечинами и нѣсколькими солидными желѣзными связями. Получившаяся такимъ образомъ рама зашивается досками. **Конструкція и расчетъ щитовъ.**

Guillemain находитъ, что гораздо лучше устраивать щиты съ двумя ребрами, а потому мы и разсмотримъ при расчетѣ реберъ именно этотъ случай.

Итакъ, опредѣлимъ величину изгибающаго момента въ свѣшивающейся части ребра на глубинѣ x отъ подпорнаго горизонта. Подобно тому какъ и прежде найдемъ:

$$M_x = \frac{1000x^2\,(x+3u)}{6\cos^2\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Если x таково, что разсматриваемое сѣченіе находится въ нижней части ребра, то

$$M_{x_1} = \frac{1000x_1^{\,2}(x_1+3u)}{6\cos^2\alpha} - Q\left(\frac{x_1}{\cos\alpha} - \lambda\right),$$

при чемъ λ обозначаетъ длину свѣшивающейся части, а Q—нормальное давленіе на ось, которое, очевидно, въ свою очередь можетъ быть выражено слѣдующимъ образомъ:

$$Q = \frac{1000H^2(H+3u)}{6\lambda'\cos^2\alpha},$$

гдѣ λ', обозначаетъ длину нижней части ребра.

Предположимъ, что $\lambda = \lambda' = \dfrac{H}{2\cos\alpha}$, какъ это имѣетъ мѣсто для судоходныхъ отверстій, тогда

$$Q = \frac{1000H(H+3u)}{3\cos\alpha},$$

и выраженіе момента M_{x_1} обратится въ слѣдующее:

$$M_{x_1}=\frac{1000x^2(x+3u)}{6\cos^2\alpha}-\frac{1000H(H+3u)}{3\cos\alpha}\left(\frac{x}{\cos\alpha}-\frac{H}{2\cos\alpha}\right),$$

или

$$M_{x_1}=\frac{1000x^2(x+3u)}{6\cos^2\alpha}-\frac{1000H(H+3u)(2x-H)}{6\cos^2\alpha}\ldots(2).$$

Maximum выраженій (1) и (2) имѣетъ мѣсто при $x=\frac{H}{2}$ и для щита шириною L выразится слѣдующимъ образомъ:

$$Max\,M=\frac{RI}{b}=\frac{1000H^2\left(\frac{H}{2}+3u\right)}{24\cos^2\alpha}.L$$

Если ширину ребра обозначимъ черезъ a, а толщину черезъ b, то

$$\frac{I}{b}=\frac{ab^2}{6},$$

и, такъ какъ на каждое ребро передается половина полнаго давленія на щитъ, то будемъ имѣть слѣдующее уравненіе:

$$\frac{Rab^2}{6}=\frac{1}{2}.\frac{1000H^2\left(\frac{H}{2}+3u\right)}{24\cos^2\alpha}.L,$$

изъ котораго можно опредѣлить размѣры a и b ребра.

Что касается до поперечинъ, то мы, не приводя ихъ расчета вслѣдствіе его простоты, считаемъ нужнымъ замѣтить, что онѣ располагаются не на равныхъ разстояніяхъ другъ отъ друга, а на разстояніяхъ, постепенно уменьшающихся къ подошвѣ щита.

Обшивка щитовъ обыкновенно дѣлается изъ досокъ толщиною въ 5 сантим.

Во всѣхъ вышеприведенныхъ расчетахъ мы принимали давленіе на щитъ статическимъ, между тѣмъ, когда отверстіе открыто, и стоятъ отдѣльные щиты, то они подвергаются давленію динамическому, которое хотя нѣкоторое время можетъ быть вдвое больше статическаго, какъ мы это увидимъ ниже.

Ввиду этого нужно при расчетахъ соотвѣтственнымъ образомъ уменьшить допускаемое напряженіе R.

Подкосъ щита. Подкосъ по той работѣ, которая выпадаетъ на его долю, представляетъ одну изъ наиболѣе простыхъ частей затвора. По своей формѣ онъ бываетъ двухъ родовъ: въ видѣ длиннаго стержня съ крюкомъ въ верхней части, или-же просто въ видѣ прямолинейнаго стержня. Крюкъ въ верхней части подкоса дѣлается для того, чтобы, когда щитъ уложенъ на флюдбетъ, подъ подкосомъ оставалось свободное мѣсто для пропуска рейки съ пятками. Въ подкосахъ прямолинейныхъ взамѣнъ этого для рейки устраивается спеціальное углубленіе въ флюдбетѣ.

Для того чтобы подкосъ былъ болѣе устойчивымъ, нижняя часть его дѣлается болѣе массивною, по внѣшнему виду похожею на балку равнаго сопротивленія. Расчитывать подкосъ на одно только сжимающее усиліе отъ щита было бы ошибочно, потому что, когда щитъ начнетъ вращаться, вода непосредственно ударяетъ въ подкосъ и раму. Кромѣ того слѣдуетъ имѣть въ виду удары, которымъ онъ можетъ подвергнуться отъ плывущихъ тѣлъ, и которымъ онъ постоянно подвергается при опусканіи щита на флюдбетъ. Что касается до длины подкоса, то она опредѣляется на основаніи вышеприведенныхъ расчетовъ, но считаемъ не лишнимъ упомянуть, что для большихъ подпоровъ хорошо по мнѣнію Guillemain'а брать ее равной длинѣ щита.

Выше мы для усилія S, сжимающаго подкосъ, имѣли слѣдующее выраженіе:

$$S = \frac{1000\, H(H+3u)}{3\, sin(\beta-5^\circ)} \cdot \frac{cos(\alpha+5^\circ)}{cos\alpha} \cdot L\,.$$

Посмотримъ теперь, какъ будетъ работать подкосъ при эксцентричномъ дѣйствіи сжимающей силы, какъ это имѣетъ мѣсто при криволинейной его формѣ. Эту эксцентричность не слѣдуетъ упускать изъ виду и при прямолинейной формѣ подкоса, такъ какъ она всегда можетъ явиться при изготовленіи отдѣльныхъ частей всего затвора.

Подкосы обыкновенно дѣлаются круглаго сѣченія, а потому обозначимъ черезъ

r—радіусъ сѣченія подкоса,

ε—величину эксцентричности силы S,

R_1—напряженіе, проявляющееся въ подкосѣ вслѣдствіе эксцентричности дѣйствія силы S.

Изгибающій моментъ равенъ $S\varepsilon$.

Моментъ сопротивленія сѣченія равенъ $\frac{\pi r^3}{4}$, а потому

$$S\varepsilon = \frac{R_1 \pi r^3}{4},$$

откуда

$$R_1 = \frac{4S\varepsilon}{\pi r^3}.$$

Это напряженіе слѣдуетъ прибавить къ тому, которое подкосъ испытываетъ при центральномъ дѣйствіи силы Q; это послѣднее, очевидно, равно:

$$R_2 = \frac{S}{\pi r^2}.$$

Такимъ образомъ полное напряженіе, которое испытываетъ подкосъ отъ силы S, будетъ

$$R = R_1 + R_2 = \frac{S}{\pi r^2}\left(1 + \frac{4\varepsilon}{r}\right)$$

Выраженіе для R показываетъ, какое важное значеніе имѣетъ эксцентричность дѣйствія силы S. Такъ при $\varepsilon = r$, напряженіе становится въ 5 разъ больше того, которое подкосъ испытывалъ-бы при центральномъ дѣйствіи силы S.

Рама, на которую опирается щитъ, обыкновенно имѣетъ трапецоидальную форму и состоитъ изъ двухъ стоекъ—реберъ и ряда поперечинъ; верхняя поперечина служитъ осью вращенія щита, а нижняя—осью вращенія самой рамы. Не вдаваясь въ описаніе конструкціи рамы, замѣтимъ только, что она, какъ и подкосъ должна быть расчитана не на одни только вытягивающія усилія, которыя она испытываетъ въ то время, когда щиты стоятъ, но и на тѣ удары, о которыхъ мы говорили при описаніи подкоса. **Рама.**

Стойки рамы испытываютъ и сжимающія усилія: когда съ служебнаго мостика начинаютъ поднимать лежащій щитъ, онѣ сжимаются силой, которая представляетъ равнодѣйствующую вѣса всего затвора (щита, рамы и подкоса) и натяженія цѣпи, служащей для подъема.

Ввиду неопредѣленности усилій, которымъ подвергаются стойки рамы, лучше всего руководиться примѣрами уже существующихъ плотинъ, близкими по своимъ условіямъ къ проектируемой, и провѣрить ихъ на вытягивающее усиліе.

$$T = \frac{1000H\,(H + 3u)\cos(\alpha + \beta)}{3\sin(\beta - 5^\circ)\cos\alpha} \cdot L.$$

Обращаемся теперь къ верхней поперечинѣ рамы, служащей осью вращенія щита.

Мы можемъ разсматривать ее какъ балку, закрѣпленную въ срединѣ: тогда каждая половина ея испытываетъ дѣйствіе двухъ силъ: одной равной $\frac{Q}{2}$, представляющей давленіе щита на шипъ, нормальное къ его плоскости; другой равной $\frac{T}{2}$, представляющей силу, растягивающую стойку рамы.

Каждая изъ этихъ силъ даетъ изгибающій моментъ относительно средины балки.

Моментъ силы, растягивающей стойку, равенъ $\frac{Tl}{2}$, если черезъ l мы обозначимъ разстояніе между осью рамы и точкой пересѣченія оси стойки съ осью вращенія; ось этого момента нормальна къ плоскости рамы.

Моментъ давленія щита равенъ $\frac{Ql'}{2}$, если черезъ l' обозначимъ разстояніе между осью рамы и срединою шипа; ось этого момента лежитъ въ плоскости, параллельной плоскости щита.

Итакъ, мы видимъ, что оси вышеуказаныхъ моментовъ образуютъ между собою уголъ равный 90°—$-(\alpha+\gamma)$, гдѣ α и γ имѣетъ указанное раньше значеніе.

При такихъ условіяхъ величина равнодѣйствующаго момента будетъ:

$$M=\sqrt{\left(\frac{Tl}{2}\right)^2+\left(\frac{Ql'}{2}\right)^2+2\left(\frac{Tl}{2}\right)\left(\frac{Ql'}{2}\right)sin\,(\alpha+\gamma)}\,.$$

Если радіусъ оси вращенія обозначимъ черезъ r, то можемъ написать слѣдующее уравненіе:

$$M=\frac{R\pi r^3}{4}\,,$$

изъ котораго и можемъ найти искомое r, или, если r извѣстно, то величину испытываемаго напряженія R.

Что касается до перерѣзывающаго усилія, испытываемаго каждымъ шипомъ, то оно, очевидно, равно $\frac{Q}{2}$, а слѣдовательно напряженіе $R'=\frac{Q}{2\pi r_1{}^2}$, гдѣ r_1— радіусъ шипа.

Расчета остальныхъ второстепенныхъ частей щита и рамы мы не помѣщаемъ здѣсь потому, что онъ или слишкомъ простъ, или-же не нуженъ, такъ какъ размѣры нѣкоторыхъ частей берутся прямо по готовымъ типамъ.

Прежде чѣмъ перейти къ разсмотрѣнію затворовъ системы Desfontaines'а, мы для бо́льшей ясности дальнѣйшаго изложенія считаемъ полезнымъ помѣстить нѣсколько сокращенную статью Lagrené, посвященную изслѣдованію нѣкоторыхъ свойствъ движущихся жидкостей. Предлагаемая имъ и работавшимъ съ нимъ инженеромъ Cuvinot теорія динамическаго давленія жидкости на щитовые затворы плотинъ, хотя и не отличается строгою научностью выводовъ, представляетъ для гидротехника большой интересъ, такъ какъ очень наглядно рисуетъ картину явленій, происходящихъ во время маневровъ съ затворами плотинъ, и даетъ выводы, весьма близкіе къ даннымъ опыта.

Опытъ изслѣдованія нѣкоторыхъ свойствъ движущейся жидкости.

Разсмотримъ случай истеченія воды въ узкую щель во всю высоту плотины, какъ это имѣетъ мѣсто въ щитахъ и спицахъ.

Глазъ получаетъ впечатлѣніе, что вытекающая струя ограничена сверху прямой, наклоненной къ горизонту подъ угломъ въ 45°.

Легко объяснить себѣ это явленіе аналитическимъ путемъ.

Обозначимъ черезъ H всю высоту подпора плотины и разсмотримъ отдѣльную струйку, вытекающую изъ щели на глубинѣ h отъ горизонта верхняго бьефа.

Координатныя оси расположимъ такъ, какъ это показано на черт. 24, такъ что x'ы будутъ положительные въ сторону нижняго бьефа, а y'и—положительными сверху внизъ, начиная отъ вершины плотины.

Предположимъ далѣе, что скорость выше плотины равна нулю.

Уравненія движенія частицъ разсматриваемой струйки будутъ:

$$\frac{d^2x}{dt^2}=0 \text{ и } \frac{d^2y}{dt^2}=g\,.$$

Первое даетъ:

$$\frac{dx}{dt}=\sqrt{2gh} \text{ и } x=t\sqrt{2gh}\,.$$

Второе-же даетъ:

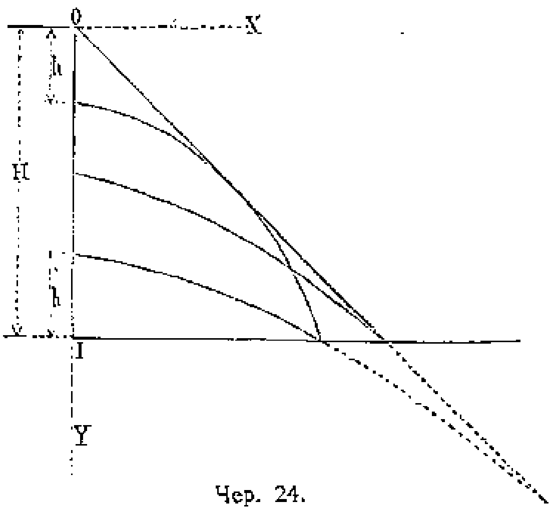
$$\frac{dy}{dt}=gt \text{ и } y=\frac{1}{2}\,gt^2+h.$$

Соединяя эти уравненія въ одно, имѣемъ:

$$x^2=4h(y-h)\,.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;(A),$$

уравненіе параболы.

Такимъ образомъ всѣ отдѣльныя струйки, представляющія въ совокупности вытекающую черезъ щель волну, описываютъ параболы, въ уравненіяхъ которыхъ h варьируетъ отъ 0 до H.



Чер. 24.

Чтобы найти ихъ анвелопу, слѣдуетъ приравнять нулю производную по h функціи:

$$x^2-4hy+4h^2.$$

Получаемъ

$$h=\frac{y}{2}.$$

Внося это значеніе h въ уравненіе (A), находимъ уравненіе анвелопы:

$$y=x.$$

Т. е. анвелопою служитъ прямая, проходящая черезъ начало координатъ и наклоненная подъ угломъ въ 45° къ горизонту.

Если стѣнка, образующая плотину, не вертикальна, прямолинейная анвелопа параболъ составляетъ съ вертикалью уголъ не больше 45°; уголъ этотъ легко подсчитать.

Горизонтальная проекцiя дуги параболы, заключающейся между плотиной и горизонтомъ нижняго бьефа, получится, если въ общее уравненiе: $x^2 = 4h (y - h)$ подставить вмѣсто y величину H; получимъ: $x = \sqrt{4h\,(H - h)}$. Выраженiе это достигаетъ maximum'a при $h = \frac{H}{2}$, а именно, тогда $x = H$.

Отсюда слѣдуетъ, что, еслибы струйки, составляющiя волну, двигались отдѣльно, то каждая точка горизонтальной плоскости, изображающей горизонтъ нижняго бьефа, отъ $x = 0$ до $x = H$, подвергалась-бы удару отъ двухъ параболъ, выходящихъ изъ точекъ, равноотстоящихъ отъ средней струйки и расположенныхъ одна выше, а другая ниже ея.

Если уравненiе одной изъ этихъ параболъ будетъ:

$$x^2 = 4h\ (y - h),$$

то уравненiе сопряженной съ нимъ, очевидно, будетъ:

$$x^2 = 4\ (H - h)\ (y - H + h).$$

Если черезъ α обозначимъ уголъ встрѣчи первой параболы съ горизонтомъ нижняго бьефа, то можемъ написать, что

$$tg\alpha = \sqrt{\frac{H - h}{h}}.$$

Точно также для сопряженной параболы получимъ:

$$tg\alpha' = \sqrt{\frac{h}{H - h}}.$$

Углы α и α', какъ мы видимъ, оказываются дополнительными.

Въ дѣйствительности вышеуказанныя параболы не могутъ существовать одновременно, но, такъ какъ вытекающая волна съ боковъ ничѣмъ не ограничена, то встрѣча двухъ струекъ вызоветъ расширеніе струи вправо и влѣво отъ щели, и только благодаря этому расширенію и сохраняется анвелопа въ видѣ прямой линіи подъ угломъ въ 45° къ вертикали.

Если толщина стѣнки, въ которой имѣется щель, равна ширинѣ этой щели, такъ что истеченіе происходитъ какъ-бы черезъ насадку, анвелопа струекъ, конечно, будетъ иная: она будетъ имѣть видъ кривой, уравненіе которой въ точности неизвѣстно, но по внѣшнему виду будетъ представлять нѣчто среднее между дугой круга радіуса H съ центромъ въ точкѣ J и дугой параболы съ вершиной въ O—началѣ координатъ и осью, направленной по OJ—оси положительныхъ y'овъ.

Если волна вытекаетъ свободно черезъ отверстіе опредѣленной ширины, что бываетъ, напримѣръ, тогда, когда открыто нѣсколько щитовъ подрядъ, струйки, ближайшія къ краямъ отверстія, имѣютъ возможность расширяться въ сторону, а потому ихъ анвелопа близка къ прямой, составляющей уголъ въ 45° съ вертикалью, струйки-же, ближайшія къ серединѣ, не имѣютъ такой свободы благодаря сосѣдству другихъ струекъ, а потому и анвелопа ихъ близка къ кривой вышеуказаннаго вида.

Такимъ образомъ сѣченіе вытекающей волны вертикальной плоскостью, нормальною къ плоскости плотины, различно и варьируетъ отъ прямой линіи до нѣкоторой кривой.

Хотя наблюденія показываютъ, что кривая, представляющая анвелопу, обыкновенно въ нижней своей части около горизонта нижняго бьефа мѣняетъ свой видъ въ зависимости отъ скорости въ нижнемъ бьефѣ, высоты плотины и ширины отверстія, мы, ввиду того, что законъ этого измѣненія не выясненъ, въ дальнѣйшемъ изложеніи будемъ предполагать, что анвелопа представляетъ однообразную кривую, идущую отъ горизонта верхняго бьефа до горизонта нижняго бьефа безъ всякихъ перегибовъ.

Когда отверстіе очень широко, вода выше плотины пріобрѣтаетъ нѣкоторую скорость и горизонтъ ея около плотины падаетъ ниже подпорнаго. Этого случая мы здѣсь разсматривать не будемъ и при дальнѣйшихъ выводахъ будемъ всегда предполагать, что скорость выше плотины равна нулю.

Кромѣ того мы примемъ еще гипотезу, что, какова-бы ни была анвелопа вытекающихъ несвободныхъ струекъ, онѣ не могутъ пересѣкаться.

Изложивши въ общихъ чертахъ характеръ истеченія воды черезъ различнаго рода отверстія, мы займемся теперь разсмотрѣніемъ вопроса о томъ дѣйствіи, которое производитъ потокъ на ту или другую часть стѣнки, образующей плотину.

Динамическое давленіе потока, предполагаемаго горизонтальнымъ, на неопредѣленную вертикальную плоскость, нормальную къ его оси.

Если разсматривать отдѣльную горизонтальную струйку, имѣющую скорость V и ударяющую въ нормальную къ ней неопредѣленную вертикальную плоскость, то динамическое давленіе ея на эту плоскость или импульсъ въ единицу времени можетъ быть выраженъ слѣдующимъ образомъ:

$$\frac{\rho}{g}\omega V^2,$$

при чемъ буквы имѣютъ слѣдующія значенія:

ρ — вѣсъ кубическаго метра воды,

g — ускореніе силы тяжести,

ω — площадь нормальнаго сѣченія струйки,

V — скорость струйки.

Если плоскость, въ которую ударяетъ струйка, наклонена подъ уклонъ α къ горизонту, то можно сдѣлать допущенiе, что нормальное давленiе, испытываемое ею, таково, какое было бы, если-бы на разсматриваемую плоскость производила ударъ струйка, нормально къ ней направленная и имѣющая скорость, равную нормальной составляющей скорости разсматриваемой струйки.

Такимъ образомъ въ этомъ случаѣ динамическое давленiе выразится слѣдующимъ образомъ:

$$\frac{\rho}{g} S V^2 \sin^2\alpha ,$$

гдѣ S — сѣченiе струйки, параллельное плоскости, выдерживающей ударъ.

Если вмѣсто отдѣльной струйки мы имѣемъ дѣло съ неопредѣленнымъ потокомъ, предполагаемымъ горизонтальнымъ и встрѣчающимъ на своемъ пути нѣкоторую плоскость, наклоненную подъ угломъ α къ горизонту, то мы можемъ сохранить для динамическаго давленiя тоже выраженiе:

$$\frac{\rho}{g} S V^2 \sin^2\alpha ,$$

если только примемъ слѣдующiя три положенiя:

1° что всѣ струйки потока имѣютъ одну и ту же скорость V.

2° что импульсъ каждой струйки такой-же, какъ если бы она была отдѣльною.

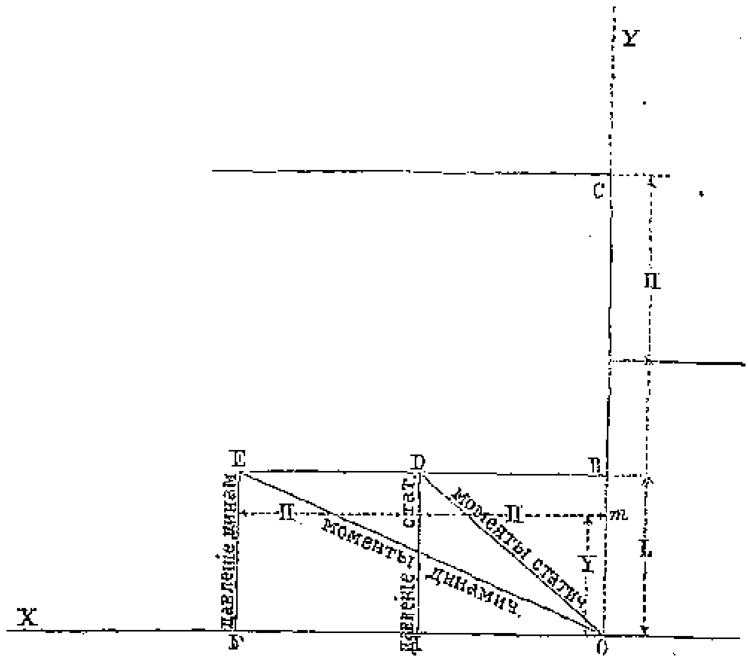
3° что давленiемъ съ низовой стороны можно пренебречь.

Какъ показали наблюденiя, вышеприведенное выраженiе даетъ результаты, довольно близкiе къ дѣйствительности, если его умножить на практическiй коэффицiентъ K, равный 0,75.

Такъ какъ мы принимали, что скорости отдѣльныхъ струекъ одинаковы, то, очевидно, что точка приложенiя равнодѣйствующей совпадаетъ съ центромъ тяжести подверженной удару площади.

Предположимъ, что два бьефа, разность горизонтовъ которыхъ равна H, отдѣлены одинъ отъ другого плотиной OC (чер. 25), въ нижней части которой открыто прямоугольное отверстіе OB высотою L и шириною 1 метръ.

Динамическое давленіе на плоскость OB отверстія можетъ быть опредѣлено по вышеприведенной



Чер. 25.

формулѣ $\frac{\rho}{g} S V^2 \sin^2\alpha$, если въ немъ принять:

$$\sin\alpha = 1,\ S = L \text{ и } V^2 = 2gH;$$

тогда получимъ: $2\rho LH$.

Такимъ образомъ оказывается, что динамическое давленіе вдвое болѣе статическаго, равнаго ρLH.

Первое можетъ быть представлено въ видѣ площади прямоугольника $OBEF$, высота котораго равна $2H$, а второе—прямоугольника $OBDJ$, высота котораго равна H.

Затѣмъ въ каждой точкѣ m, разстоянiе которой отъ точки O равно Y, моментъ динамическаго давленiя на единицу площади относительно точки O равенъ $2HY$, а потому уравненiе линiи моментовъ динамическаго давленiя, отнесенное къ осямъ OX и OY, будетъ $X=2HY$ — уравненiе дiаганали OE прямоугольника $OBEF$.

Точно такимъ-же образомъ находимъ, что дiаганаль OD прямоугольника $OBDI$ представляетъ линiю моментовъ статическаго давленiя.

Динамическое давленiе подпора на вертикальную плоскость.

Положимъ, что мы имѣемъ плотину съ подпоромъ H. Постараемся выяснить, какое динамическое давленiе производитъ этотъ подпоръ H на вертикальную плоскость, совпадающую съ продольной осью плотины, такъ напримѣръ, посмотримъ, какому давленiю подвергнется въ первые моменты стоящiй въ вертикальномъ положенiи отдѣльный щитъ, когда всѣ остальные уже уложены на флюдбетъ.

Въ такихъ-же условiяхъ находятся и спицы, если онѣ поставлены съ большими промежутками.

Струйка, выходящая изъ отверстiя на глубинѣ h отъ горизонта верхняго бьефа, имѣетъ скорость равную $\sqrt{2gh}$ и сѣченiе dh на одинъ метръ горизонтальной ширины, а потому динамическое давленiе, производимое ею на вертикальную плоскость, согласно вышеприведенному, равно:

$$dP=\frac{\rho}{g}\,2ghdh\,.$$

Полное давленiе на вертикальную плоскость въ предѣлахъ всей высоты подпора, очевидно, будетъ:

$$P=\rho\int_0^H 2hdh=\rho H^2\,,$$

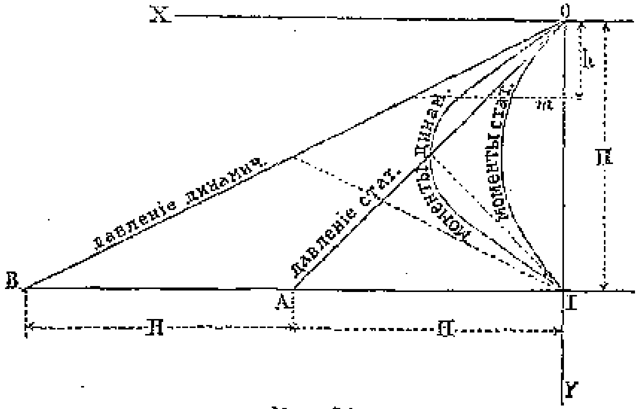
т. е. вдвое больше статическаго, равнаго $\frac{1}{2}\,\rho H^2$.

Въ каждой точкѣ m, находящейся на глубинѣ h отъ горизонта верхняго бьефа, динамическое давленіе на единицу площади равно:

$$\frac{dP}{dh} = \rho 2h.$$

Линіей динамическихъ давленій поэтому служитъ прямая OB, имѣющая двойной уклонъ (два основанія на одну высоту), между тѣмъ какъ линіей статическихъ давленій служитъ прямая OA, имѣющая одиночный уклонъ (чер. 26).

Треугольникъ OBI представляетъ полное динамическое давленіе на погонный метръ плотины, между тѣмъ какъ полное статическое давленіе выражается площадью треугольника AOI, при чемъ точка приложенія какъ того, такъ и другого давленія находится на $\frac{1}{3}$ H, считая отъ точки I; конечно для полученія величины давленія, нужно число, выражающее площадь, умножить на ρ — плотность воды.



Чер. 26.

Элементарный моментъ динамическаго давленія струйки, находящейся на глубинѣ h отъ подпорнаго горизонта, относительно горизонтальной оси I, нормальной къ плоскости чертежа равенъ:

$$dM = 2\rho h(H - h)dh.$$

8

Моментъ полнаго давленія на всю высоту подпора H относительно той-же оси, очевидно, будетъ тогда

$$M = \rho \int_0^H 2h(H-h)dh = \frac{1}{3}\rho H^3 .$$

Далѣе, такъ какъ динамическое давленіе въ каждой точкѣ m на единицу площади выражается величиною $2h$, то моментъ его относительно точки I равенъ $2h(H-h)$; а потому, замѣняя h черезъ Y, получаемъ слѣдующее уравненіе кривой динамическихъ моментовъ, отнесенное къ осямъ OX и OY:

$$X = 2Y(H-Y) .$$

Такимъ-же образомъ для кривой статическихъ моментовъ получимъ уравненіе:

$$X = Y(H-Y) .$$

Какъ то, такъ и другое уравненіе представляютъ параболы, изображенныя на чер. 26.

Считаемъ нелишнимъ указать, что изъ разсмотрѣнныхъ нами двухъ случаевъ, первый имѣетъ примѣненіе тогда, когда флюдбетъ постоянной части плотины опущенъ ниже горизонта нижняго бьефа, а второй, когда онъ поднятъ выше того-же горизонта.

Динамическое давленіе подпора на стѣнку плотины, наклоненную подъ угломъ α къ горизонту.

Выше мы предполагали, что стѣнка, образующая плотину—вертикальна. Разсмотримъ теперь случай, когда эта стѣнка наклонена подъ угломъ α къ горизонту.

Представимъ себѣ, что въ этой стѣнкѣ сдѣлано отверстіе; напримѣръ, опущенъ щитъ; найдемъ величину динамическаго давленія на площадь отверстія при ширинѣ его въ 1 метръ и высотѣ подпора H.

Спицы также ставятся подъ нѣкоторымъ угломъ къ вертикали, а потому разсматриваемый нами случай можетъ быть отнесенъ и къ нимъ.

Если струйка, находящаяся на глубинѣ h отъ подпорнаго горизонта и имѣющая скорость V, равную $\sqrt{2gh}$, встрѣчаетъ элементъ dl щита, то динамическое давленіе, производимое ею на этотъ послѣдній, выразится такъ:

$$dP = \frac{\rho}{g} V^2 dl.$$

Слѣдуетъ замѣтить, что направленіе скорости V — нормально къ плоскости стѣнки, образующей плотину.

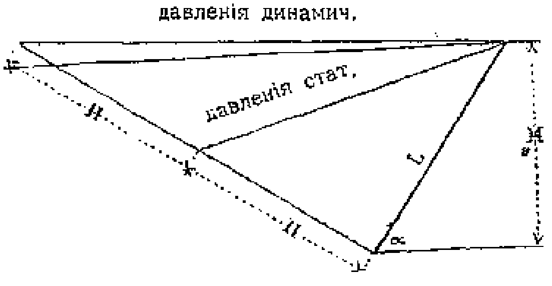
Замѣняя V^2 черезъ $2gh$ и dl черезъ $\frac{dh}{sin\alpha}$, имѣемъ:

$$dP = 2\rho \frac{hdh}{sin\alpha}$$

и

$$P = \rho \int_0^H \frac{2hdh}{sin\alpha} = \rho \frac{H^2}{sin\alpha} = \rho LH,$$

гдѣ L означаетъ длину щита.

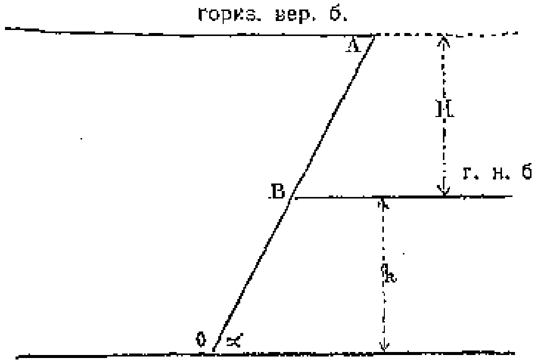


Чер. 27.

Статическое давленіе на ту же площадь L равно $\frac{1}{2}\rho LH$, т. е., равно половинѣ динамическаго.

Динамическое давленіе на единицу площади выражается посредствомъ $\frac{dP}{dl} = 2\rho h$, а статическое—посредствомъ $\frac{dP}{dl} = \rho h$. Слѣдовательно эти давленія могутъ быть представлены въ видѣ двухъ треугольниковъ, имѣющихъ основаніемъ L, а высотою $2H$—для динамическаго давленія и H—для статическаго (чер. 27).

Разсмотримъ теперь случай, когда стѣнка, образующая плотину и наклоненная подъ угломъ α къ горизонту, частью покрыта водою нижняго бьефа, а частью возвышается надъ нею (чер. 28).



Чер. 28.

Динамическое давленіе на часть AB на основаніи выше приведеннаго равно $\rho H.AB$, и моментъ его относительно точки O будетъ:

$$\rho H.AB\left(OB+\frac{1}{3}AB\right)=\rho H\cdot\frac{H}{sin\alpha}\left(\frac{h}{sin\alpha}+\frac{1}{3}\frac{H}{sin\alpha}\right)=$$

$$=\rho\frac{H^2}{sin^2\alpha}\left(\frac{1}{3}H+h\right).$$

Динамическое давленіе на часть OB равно:

$$\frac{\rho}{g}.OB.V^2\ sin^2\alpha=\frac{\rho}{g}\cdot\frac{h}{sin\alpha}\cdot 2gH\,sin^2\alpha=2\rho Hh\,sin\alpha,$$

и моментъ его относительно точки O будетъ:

$$2\rho Hh\,sin\alpha\cdot\frac{OB}{2}=\rho Hh^2.$$

Такимъ образомъ полный моментъ динамическаго давленія на стѣнку OA шириной въ 1 метръ относительно горизонтальной оси, проходящей черезъ точку O, равенъ:

$$\rho H\left(\frac{1}{3}\frac{H^2}{sin^2\alpha}+\frac{Hh}{sin^2\alpha}+h^2\right),$$

при чемъ при пользованіи этимъ выраженіемъ на практикѣ, его нужно умножить еще на коэффиціентъ K.

Динамическое давленіе падающей волны на горизонтальную плоскость.

Положимъ, что въ плотинѣ съ подпоромъ H сдѣлано отверстіе, черезъ которое изъ верхняго бьефа волна падаетъ на горизонтальною плоскость, представляемую горизонтомъ нижняго бьефа, при чемъ стѣнку плотины предполагаемъ вертикальною (чер. 29).

Примемъ, какъ и раньше, что не можетъ происходить растеканія струекъ въ стороны; струйки описываютъ кривыя, параллельныя анвелопѣ; такъ какъ видъ послѣдней въ точности не извѣстенъ, то мы примемъ ее за четверть окружности, описанной радіусомъ H изъ точки A.

Въ самомъ дѣлѣ, разсмотримъ струйку, выходящую изъ отверстія на глубинѣ h отъ подпорнаго горизонта: объемъ ея между плотиной и горизонтомъ нижняго бьефа равенъ:

$$dV = dh\sqrt{4h(H-h)};$$

и, еслибы струйки были свободныя, то объемъ погоннаго метра падающей волны былъ-бы равенъ:

$$V = \int_0^H dh\sqrt{4h(H-h)}.$$

Нельзя, конечно, утверждать, что выраженіе это останется такимъ-же и для случая, когда струйки несвободны, но можно съ увѣренностью сказать, что вышеприведенный интегралъ всетаки для площади кривой анвелопы дастъ результаты, довольно близкіе къ истинѣ.

Мы имѣемъ:

$$\int_0^H dh\sqrt{4h(H-h)} = 2\int_0^H dh\sqrt{Hh - h^2 + \frac{H^2}{4} - \frac{H^2}{4}} =$$

$$= H\int_0^H dh\sqrt{1 - \left(\frac{2h-H}{H}\right)^2}$$

Обозначимъ $\frac{2h-H}{H}$ черезъ $sin\alpha$, тогда интегралъ приметъ видъ:

$$\frac{H^2}{2}\int cos^2\alpha\, d\alpha = \frac{H^2}{2}\int \frac{1+cos2\alpha}{2} d\alpha = \frac{H^2}{4}\left(\alpha + \frac{1}{2}\, sin2\alpha\right) + C.$$

Для $h = O$ имѣемъ $V = O$ и $\alpha = -\frac{\pi}{2}$, откуда $C = \frac{H^2}{4} \cdot \frac{\pi}{2}$.

Для $h = H$ имѣемъ $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $sin\ 2\alpha = O$.

А потому:

$$V = \int_0^H dh \sqrt{4h(H-h)} = \frac{H^2}{4}\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{\pi H^2}{4}.$$

Такъ какъ мы получили площадь четверти круга, то мы въ правѣ допустить, что ограничивающая эту площадь кривая—четверть окружности радіуса H и представляетъ дѣйствительную кривую анвелопу.

Возвратимся опять къ отысканію динамическаго давленія, испытываемаго горизонтальной плоскостью.

Какъ мы уже видѣли раньше, струйка, выходящая изъ отверстія на глубинѣ h отъ подпорнаго горизонта, въ точкѣ пересѣченія съ осью AX имѣетъ абсциссу равную $\sqrt{4h(H-h)}$. Каждая частица разсматриваемой струйки при выходѣ получаетъ горизонтальное давленіе, опредѣляемое высотою h, а затѣмъ она подвержена только дѣйствію силы тяжести.

Начальныя горизонтальныя давленія не могутъ имѣть вліянія на вертикальную равнодѣйствующую, которая представляетъ искомое динамическое давленіе.

Это послѣднее въ разсматриваемомъ случаѣ есть, очевидно, ничто иное, какъ сумма импульсовъ силы тяжести, дѣйствушихъ въ единицу времени на каждую частицу вытекающей струи; другими словами, оно есть ничто иное, какъ вѣсъ струи, заключающейся между плотиной и горизонтомъ нижняго бьефа.

Точка приложенія этого давленія, очевидно, имѣетъ абсциссу равную $\sqrt{4h(H-h)}$.

Объемъ струи во время t равенъ:

$$tdh\sqrt{2gh},$$

но мы знаемъ, что $t=\frac{x}{\sqrt{2gh}}$, а потому объемъ, соотвѣтствующій абсциссѣ x, равенъ xdh. Такимъ образомъ для абсциссы $x=\sqrt{4h(H-h)}$ выраженіе объема получится въ слѣдующемъ видѣ:

$$dv=dh\sqrt{4h(H-h)}.$$

Вѣсъ этого объема, очевидно, получится черезъ умноженіе dv на ρ; получимъ:

$$dp=\rho dh\sqrt{4h(H-h)},$$

а моментъ его относительно точки A будетъ равенъ:

$$dM=\rho 4h(H-h)\,dh.$$

Послѣднее выраженіе, выведенное нами для отдѣльной свободной струи, конечно, можетъ и не представлять момента давленія струи несвободной, но за то можно смѣло предположить, что моментъ полнаго давленія всей волны можетъ быть представленъ въ видѣ:

$$M=\rho\int_0^H 4h(H-h)\,dh=\frac{2}{3}\rho H^3.$$

Въ самомъ дѣлѣ, моментъ этотъ зависитъ только отъ внѣшнихъ силъ, а потому внутреннія реакціи, связывающія свободу струй и заставляющія ихъ описывать вмѣсто параболъ кривыя, параллельныя анвелопѣ, на величину его никакого вліянія не имѣютъ.

Замѣтимъ далѣе, что, какова бы ни была анвелопа вытекающей волны, моментъ вѣса погоннаго метра этой послѣдней долженъ быть вдвое меньше момента динамическаго давленія ея на горизонтальную плоскость.

Въ самомъ дѣлѣ, объемъ свободной струи, выходящей съ глубины h отъ подпорнаго горизонта, какъ мы уже видѣли, равенъ xdh, т. е. пропорціоналенъ абсциссѣ x; абсцисса центра тяжести той-же свободной струи равна поэтому $\frac{1}{2}\sqrt{4h\,(H-h)}$, т. е. половинѣ плеча динамическаго давленія.

Такимъ образомъ мы видимъ, что моментъ вѣса свободной струи равенъ половинѣ момента того давленія, которое она производитъ на горизонтальную плоскость.

Это свойство мы можемъ считать справедливымъ и для несвободныхъ струй, такъ какъ и въ этомъ случаѣ общая сумма моментовъ остается таже самая, т. е. мы можемъ принять, что моментъ вѣса волны равенъ $\frac{1}{3}\rho H^3$.

Если анвелопа представляетъ четверть окружности радіуса H, то, обозначивъ черезъ x_1—абсциссу центра тяжести площади четверти круга, моментъ площади находимъ слѣдующимъ образомъ:

$$\frac{\pi H^2}{4}\cdot x_1 = \int_0^H xy\,dx = \int_0^H x\sqrt{H^2-x^2}\cdot dx = \frac{1}{3}H^3 —$$

—выводъ, показывающій, что истинная анвелопа довольно близко подходитъ къ принятой нами четверти окружности.

Динамическое давленіе, какъ равное вѣсу волны, оказывается поэтому равнымъ:

$$\rho\frac{\pi H^2}{4} = \rho \cdot 0{,}785 H^2,$$

и абсцисса точки приложенія его, очевидно, получится слѣдующимъ образомъ:

$$\frac{2}{3}H^3 : \frac{\pi H^2}{4} = \frac{8H}{3\pi} = 0{,}849 H.$$

Конечно на всѣ полученные выводы слѣдуетъ смотрѣть только какъ на приближеніе, но все-же они могутъ дать возможность произвести довольно правильную оцѣнку достоинствъ или недостатковъ той или другой разборчатой плотины.

Если мы желаемъ изслѣдовать распредѣленіе давленій на горизонтальной плоскости и построить кривую, ординаты которой представляли-бы давленіе на единицу площади въ каждой точкѣ ея, то слѣдуетъ принять еще новыя гипотезы, которыя заставятъ насъ, конечно, еще болѣе удалиться отъ истины и дадутъ результаты нѣсколько отличающіеся отъ вышеприведенныхъ.

Мы предполагали, что внутреннія струи вытекающей волны описываютъ кривыя, которыя между собою не пересѣкаются, но это вопросъ еще спорный, что наглядно можно видѣть изъ примѣра истеченія струи изъ резервуара: мы видимъ, что сѣченіе струи сначала постепенно уменьшается до нѣкотораго предѣла, а затѣмъ опять начинаетъ увеличиваться. Объяснить это явленіе можно только взаимнымъ прониканіемъ струй.

Можно предположить, что и при паденіи воды можетъ происходить нѣчто подобное вышеуказанному явленію, а потому для дальнѣйшихъ выводовъ мы примемъ слѣдующую гипотезу.

Вообразимъ себѣ, что четверть окружности, представляющая анвелопу, опускается мало по малу внизъ скользя вдоль оси y'овъ такимъ образомъ, что каждая изъ точекъ кривой имѣетъ вертикальное перемѣщеніе. При такомъ движеніи анвелопа займетъ рядъ положеній, которыя можно разсматривать какъ кривыя, описываемыя въ дѣйствительности несвободными струями.

Если мы примемъ такую гипотезу, то струйка, выходящая изъ отверстія на глубинѣ h отъ подпорнаго горизонта, должна пересѣчь горизонтальную поверхность нижняго бьефа въ точкѣ, абсцисса которой получается изъ уравненія круга $x^2 + y^2 = H^2$, если въ него подставить $y = h$. Получимъ.

$$X = \sqrt{H^2 - h^2}.$$

Моментъ давленія, производимаго въ этой точкѣ горизонтальной плоскости несвободной струей, неизвѣстенъ, но мы можемъ предположить, что онъ таковъ-же, какъ и для струи свободной, выходящей изъ отверстія съ той-же высоты.

Сдѣлавъ такое предположеніе и обозначивъ черезъ Y давленіе на единицу площади въ точкѣ съ абсциссой X, мы можемъ написать слѣдующее равенство:

$$-XYdX = 4h(H - h)dh \quad . \; . \; . \; . \; . \; (1),$$

причемъ мы дали dX знакъ обратный dh потому, что зависимость между этими величинами такова, что съ увеличеніемъ одной другая уменьшается.

Соотношеніе $X^2 = H^2 - h^2$ даетъ $h = \sqrt{H^2 - X^2}$ и $XdX = -hdh$.

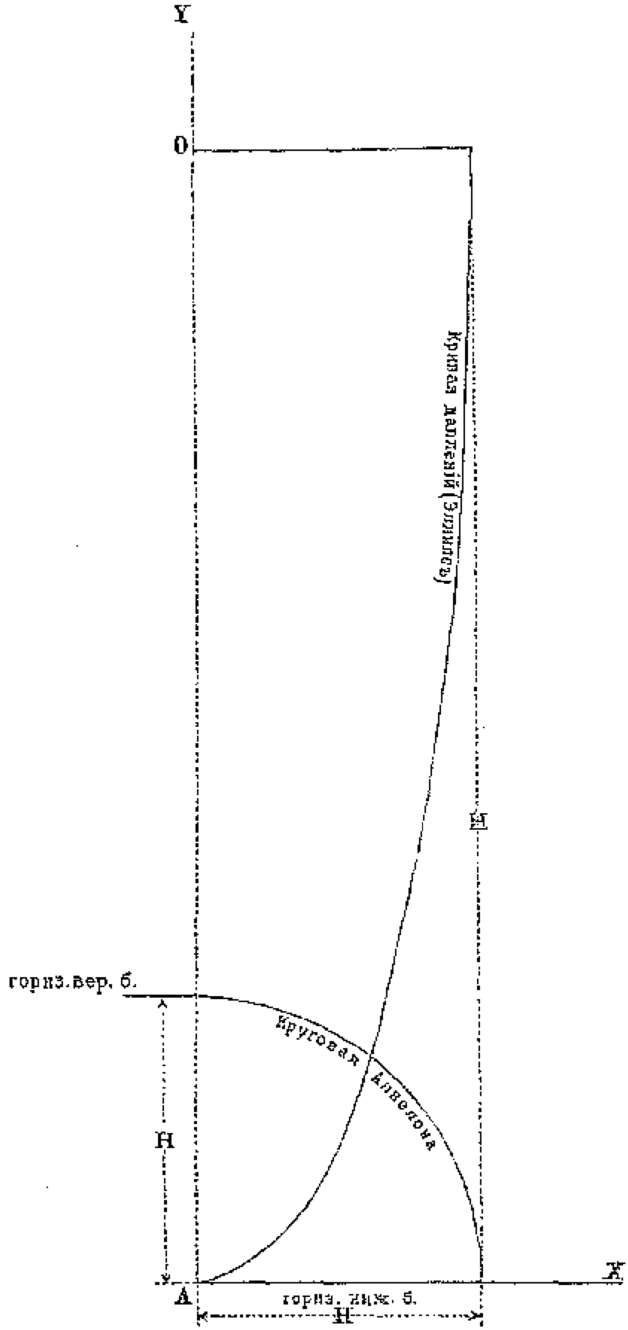
Замѣняя въ уравненіи (1) hdh черезъ $-XdX$ получимъ:

$$XYdx = 4XdX(H - \sqrt{H^2 - X^2}) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (2).$$

откуда послѣ нѣкоторыхъ дѣйствій приходимъ къ уравненію:

$$(4H - Y)^2 = 16(H^2 - X^2) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (2).$$

Уравненіе (2) и даетъ законъ распредѣленія давленій; очевидно, что оно представляетъ элипсъ, имѣющій центръ въ точкѣ O на оси Y'овъ на высотѣ $4H$ отъ горизонта нижняго бьефа; его большая



Чер. 29.

полуось—вертикальна и равна $4H$, а малая полуось—горизонтальна и равна H (чер. 29).

Кривая давленій на длинѣ H горизонтальной плоскости, принимающей падающую волну, очевидно, будетъ четвертью вышеуказаннаго элипса.

Площадь кривой давленій есть разность между площадью прямоугольника $4H^2$ и площадью четверти элипсиса πH^2, т. е. она равна:

$$H^2(4-\pi)=0{,}8584H^2 .$$

Динамическое давленіе, поэтому, будетъ равно $0{,}8584H^2\rho$.

Итакъ мы видимъ, что полученная нами величина динамическаго давленія немного разнится отъ выведенной нами раньше и равной $\frac{\pi H^2}{4}\rho=0{,}7854H^2\rho$.

Абсцисса центра тяжести площади кривой давленія равна:

$$\frac{2}{3}H^2:(4-\pi)H^2=\frac{2H}{3(4-\pi)}=0{,}776H ,$$

между тѣмъ какъ раньше мы нашли для плеча динамическаго давленія значеніе

$$\frac{8H}{3\pi}=0{,}849H .$$

Полученныя нами разницы результатовъ показываютъ, что принятыя гипотезы не вполнѣ правильны: четверть элипса показываетъ только общій характеръ распредѣленія динамическаго давленія на горизонтальной плоскости.

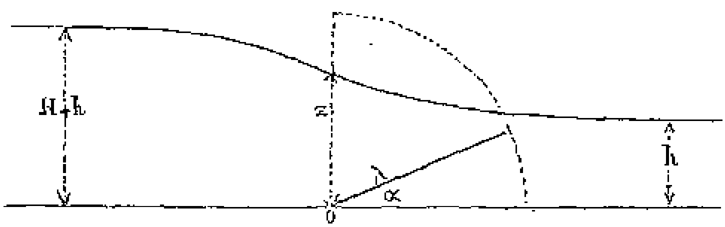
Для полученія болѣе точныхъ формулъ необходимо произвести тщательные опыты, и на настоящую статью нужно смотрѣть только какъ на попытку нѣсколько освѣтить этотъ темный пока вопросъ.

Плотины системы Desfontaines'a.

Предполагая, что читатели вполнѣ знакомы съ конструкціей плотины системы Desfontaines'a, мы небудемъ останавливаться на этомъ вопросѣ и займемся изслѣдованіемъ тѣхъ явленій, которыя связаны съ поднятіемъ и опусканіемъ щитовъ во время маневровъ *).

Опредѣленіе момента, сопротивляющагося поднятію щита.

Положимъ, что отверстіе открыто, и щиты лежатъ. Спрашивается, при какихъ условіяхъ щиты придутъ опять въ вертикальное положеніе. Для выясненія этого вопроса мы разсмотримъ отдѣльно моменты, сопротивляющіеся поднятію щитовъ, и моменты, вызывающіе это поднятіе, которые мы назовемъ движущи-



Чер. 30.

ми. Очевидно, что въ моментъ передъ подъемомъ щитовъ продольная профиль потока имѣетъ видъ, показанный на чет. 30, гдѣ H обозначаетъ разность гори-

*) Желающихъ ознакомиться болѣе детально съ конструкціей плотины мы отсылаемъ къ труду профессора В. Е. Тимонова „Водоподъемныя плотины системы Луишь-Дефонтена", гдѣ они найдутъ также интересныя свѣдѣнія относительно дальнѣйшаго распространенія этой системы и примѣненія ея къ судоходнымъ отверстіямъ.

зонтовъ верхняго и нижняго бьефовъ, а $H+h$ — толщину волны выше плотины, считая ее отъ горизонта верхняго бьефа до порога постоянной части.

Если первый поднимаемый щитъ составляетъ уголъ α съ горизонтомъ, то онъ испытываетъ сопротивленіе вращенію, равное на одинъ погонный метръ

$$K\frac{\rho}{g}\lambda V^2 sin^2\alpha,$$

при чемъ V представляетъ среднюю скорость встрѣчающихъ его струй,

ρ—плотность воды,

K—практическій коэффиціентъ, величина котораго приблизительно 0,75.

Моментъ этого сопротивленія равенъ:

$$\frac{1}{2}K\frac{\rho}{g}\lambda^2 V^2 sin^2\alpha.$$

Съ увеличеніемъ угла α этотъ моментъ увеличивается и достигаетъ своего maximum'а при $\alpha=90°$, когда его величина становится равною:

$$\frac{1}{2}K\frac{\rho}{g}V^2 z^2,$$

гдѣ z обозначаетъ толщину волны въ сѣченіи надъ осью вращенія щита.

Замѣнимъ V^2 черезъ $2g\,(H+h-z)$, тогда сопротивляющійся моментъ приметъ видъ:

$$K\rho(H+h-z)z^2.$$

Выраженіе это достигаетъ maximum'а при $z= =\frac{2}{3}(H+h)$, а именно, тогда оно равно;

$$M_R=\frac{4}{27}K\rho(H+h)^3.$$

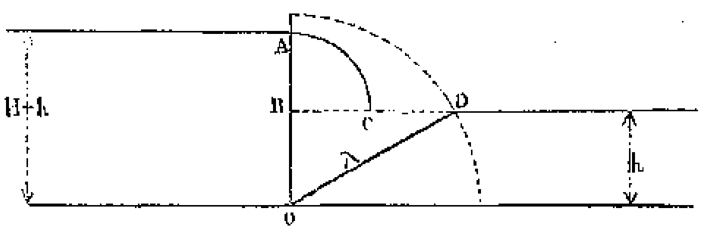
Найдемъ теперь величину сопротивляющагося момента одного изъ послѣднихъ щитовъ.

Во время закрытія нѣсколькихъ предыдущихъ щитовъ горизонтъ верхняго бьефа могъ нѣсколько подняться, а нижняго бьефа—опуститься; еслибы они даже и остались тѣ же, то всетаки характеръ переливающейся волны будетъ совсѣмъ другой, а именно, она будетъ имѣть видъ, показанный на чер. 31.

Разсмотримъ такое положенiе щита при его поднятiи, когда верхнее ребро его только что касается горизонта нижняго бьефа; при такомъ положенiи его сопротивляющiйся моментъ достигаетъ maximum'а, при чемъ предполагается что вода выше стоящихъ уже щитовъ не имѣетъ скорости.

Если мы разсмотримъ матерiальную систему $ACDOA$, то моментъ относительно точки O внѣшнихъ силъ, дѣйствующихъ на нее, долженъ равняться сопротивляющемуся моменту щита.

То есть моментъ реакцiи щита OD долженъ равняться суммѣ: 1° момента динамическаго давленiя подпора на вертикальную плоскость AB, 2° момента динамическаго давленiя потока на вертикальную плоскость BO и 3° момента вѣса падающей волны BAC.



Чер. 31.

Моментъ относительно точки O динамическаго давленiя на AB на одинъ погонный метръ равенъ:

$$m_1 = K\rho H^2(h + \frac{1}{3} H).$$

Моментъ динамическаго давленiя на BO равенъ:

$$m_2 = K\frac{\rho}{g} \cdot h \cdot 2gH \cdot \frac{h}{2} = K\rho H h^2.$$

Моментъ вѣса падающей волны BAC равенъ:

$$m_3 = K \cdot \frac{1}{3} \rho H^3 .$$

Искомый сопротивляющійся моментъ на погонный метръ ширины щита поэтому равенъ:

$$M_R = m_1 + m_2 + m_3 = K\rho H \left(\frac{2}{3} H^2 + Hh + h^2\right) .$$

Если предположить, что сумма $H + h$ постоянна, то сопротивляющійся моментъ будетъ увеличиваться съ уменьшеніемъ h и достигнетъ своего maximum'а при $h = O$.

Сопротивляющійся моменъ любого щита можетъ быть, конечно, опредѣленъ помошью вышеприведенныхъ формулъ, если извѣстны только горизонты верхняго и нижняго бьефа; но, такъ какъ промежутокъ времени, въ теченіе котораго происходитъ закрытіе отверстія водослива, бываетъ обыкновенно довольно коротокъ, то горизонты эти измѣняются довольно мало, а потому можно примѣнить слѣдующій приблизительный способъ: сначала найти моментъ перваго щита, затѣмъ послѣдняго, чтоже касается до остальныхъ щитовъ, то принять, что моменты ихъ измѣняются пропорціонально ихъ разстояніямъ отъ крайнихъ щитовъ.

Опредѣленіе момента, поднимающаго щитъ.

При опредѣленіи момента, поднимающаго щитъ, мы предположимъ, что горизонтъ нижняго бьефа не опускается ниже оси вращенія щита.

Если длину контръ-щита обозначить черезъ λ', а разность давленій на обѣ стороны его черезъ y, то моментъ, поднимающій щитъ, выразится слѣдующимъ образомъ:

$$\frac{1}{2} \rho \lambda'^2 y .$$

Такимъ образомъ мы видимъ, что вопросъ этотъ рѣшается очень просто, если извѣстна разность давленій y.

Прежде всего нужно вполнѣ выяснить себѣ, какъ функціонируютъ водопроводные каналы съ верховой и низовой стороны контръ-щита.

Положимъ, что верховой каналъ питается водою только съ одного конца.

Если щиты лежатъ, и ихъ нужно поднять, то сообщаемъ верховой каналъ съ верхнимъ бьефомъ; тогда всѣ контръ-щиты выйдутъ изъ своего первоначальнаго положенія, и вода будетъ проходить въ низовой каналъ черезъ щель шириною въ 0,004 метра, которая представляетъ зазоръ между контръ-щитомъ и внутренней стѣнкой канала. Такимъ образомъ верховой каналъ функціонируетъ какъ труба, закрытая съ одного конца и имѣющая по всей длинѣ равномѣрно распредѣленныя отверстія.

Низовой каналъ функціонируетъ подобно верховому съ тою только разницею, что въ немъ, наоборотъ, по всей его длинѣ вода не выходитъ, а входитъ подъ вліяніемъ напора верхняго бьефа.

Такимъ образомъ измѣненія давленій въ верховомъ каналѣ вызываютъ аналогичныя измѣненія и въ низовомъ каналѣ.

Если потеря напора въ верхнемъ каналѣ на протяженіи его l равна h, то потеря двужущаго давленія на туже длину равна $2h = \Delta y$, такъ что угловой коэффиціентъ $\frac{dy}{dl}$ касательной къ кривой движущихъ давленій оказывается вдвое больше углового коэффиціента $\frac{dh}{dl}$ касательной къ напорной линіи въ верховомъ каналѣ, и мы можемъ написать соотношеніе

$$\frac{dh}{dl} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dy}{dl}.$$

Разсмотримъ водосливъ въ то время, когда уже поднято нѣсколько щитовъ, и обозначимъ черезъ N

9

сѣченіе верхового канала по послѣднему уже стоящему щиту, а черезъ l его разстояніе отъ закрытаго конца канала.

Примемъ, что контръ-щиты въ стоячемъ положеніи не пропускаютъ воды, тогда верховой каналъ отъ отверстія питающаго водопровода до послѣдняго стоящаго щита не имѣетъ утечекъ; расходъ его, постоянный отъ одного конца до другого, равенъ суммѣ всѣхъ утечекъ, которыя происходятъ вдоль всего периметра еще лежащихъ контръ-щитовъ.

Напорная линія на всемъ протяженіи, гдѣ нѣтъ утечекъ воды, имѣетъ видъ прямой, идущей отъ горизонта верхняго бьефа и имѣющей уклонъ i, величина котораго опредѣляется равенствомъ

$$Q^2 = \alpha D^5 i\,,$$

въ которомъ буквы имѣютъ слѣдующія значенія:

Q—сумма утечекъ воды по периметру контръщитовъ на протяженіи l водослива, гдѣ отверстіе его открыто; эта сумма равна секундному расходу питающаго водопровода.

D—діаметръ живаго сѣченія верхового канала въ томъ мѣстѣ, гдѣ онъ закрытъ.

α—коэффиціентъ, который по Dupuit равенъ $\frac{1}{0{,}0025} = 400$ (Traité de la conduite des eaux).

По Bresse'у величину α можно принять равною 250 (Cours de mécanique appliquée, hydraulique).

За сѣченіемъ N напорная линія въ верховомъ каналѣ принимаетъ видъ нѣкоторой кривой; въ начальной точкѣ ея, соотвѣтствующей сѣченію N, касательная къ ней имѣетъ уклонъ i, а въ конечной она горизонтальна, такъ какъ въ крайнемъ сѣченіи нѣтъ уже расхода.

Изслѣдуемъ эту кривую; обозначимъ черезъ

y—разность давленій на обѣ стороны контръщита въ произвольномъ сѣченіи M, находящемся между сѣченіемъ N и закрытымъ концомъ верхового канала.

x—разстояніе сѣченія M отъ закрытаго конца верхового канала.

h—напоръ въ сѣченіи M верхового канала.

q—расходъ канала въ сѣченіи M.

Тогда можемъ написать:

$$q^2 = \alpha D^5 \frac{dh}{dx}$$

или

$$q^2 = \frac{\alpha}{2} D^5 \frac{dy}{dx} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (1)$$

Если мы обозначимъ черезъ σ площадь отверстія, образуемаго зазоромъ контръ-щита на протяженіи погоннаго метра, то расходъ черезъ него около сѣченія M выразится черезъ $m\sigma\sqrt{2gy}$, а потому полный расходъ q канала на протяженіи отъ сѣченія M до закрытаго конца его, очевидно, будетъ равенъ:

$$q = \int_0^x m\sigma\sqrt{2gy}\; dx\,,$$

откуда

$$dq = m\sigma\sqrt{2gy}\; dx \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (2)$$

Перемножая почленно уравненія (1) и (2), получимъ:

$$2q^2 dq = \alpha m\sigma D^5 \sqrt{2gy}\; dy,$$

откуда

$$q^3 = \alpha m\sigma\sqrt{2g}\; D^5 y^{3/2} + C\,.$$

Подставляя вмѣсто q его значеніе, даваемое уравненіемъ (1), получимъ:

$$q^3 = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{\frac{3}{2}} D^{\frac{15}{2}} \left(\frac{dy}{dx}\right)^{3/2},$$

и слѣдовательно

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^{3/2} = \frac{\alpha m\sigma\sqrt{2g}\, D^5}{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{3/2} D^{\frac{15}{2}}}\, y^{3/2} + C\,,$$

или

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^{3/2} = -\frac{2^{3/2} m\sigma\sqrt{2g}}{\alpha^{1/2} D^{3/2}}\, y^{3/2} + C\,.$$

Примемъ, что

$$\mu^{3/2} = \frac{2^{3/2} m\sigma\sqrt{2g}}{\alpha^{3/2}\cdot D^{3/2}}\,,$$

тогда

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^{\frac{3}{2}} = \mu^{3/2}(y^{3/2} + C')\,,$$

или

$$\frac{dy}{dx} = \mu(y^{3/2} + C')^{\frac{2}{3}}$$

Какъ мы уже говорили выше, при $x = 0$ и $\frac{dx}{dy} = 0$, а потому, если обозначить черезъ y_0 неизвѣстное пока движущее давленіе на контръ-щитъ въ концѣ канала, то получимъ: $C' = -y_0^{3/2}$, и слѣдовательно

$$\frac{dy}{dx} = \mu(y^{3/2} - y_0^{3/2})^{2/3}\,.$$

Таково дифференціальное уравненіе кривой движущихъ давленій.

Чтобы интегрировать его, введемъ новую перемѣнную z, равную

$$z = \left(1 - \frac{y_0^{3/2}}{y^{3/2}}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Тогда дифференціальное уравненіе приметъ видъ:

$$dx = \frac{2}{\mu}\cdot\frac{dz}{1 - z^3}\,.$$

Но

$$\frac{1}{1-z^3} = \frac{1}{3}\left[\frac{1}{1-z} + \frac{z+2}{z^2+z+1}\right] = \frac{1}{3}\left[\frac{1}{1-z} + \frac{1}{2}\cdot\frac{2z+1}{z^2+z+1} + \frac{\frac{3}{2}}{\left(z+\frac{1}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}}\right],$$

откуда

$$\int \frac{dz}{1-z^3} = \frac{1}{3}\Big[-Log(1-z) + \frac{1}{2}\,Log(z^2+z+1) +$$

$$+\sqrt{3}\,arctg\,\frac{2z+1}{\sqrt{3}}\Big].$$

Но, такъ какъ

$$dx = \frac{2}{\mu}\cdot\frac{dz}{1-z^3},$$

то

$$x = \frac{2}{3\mu}\Big[-Log(1-z) + \frac{1}{2}\,Log(z^2+z+1) +$$

$$+\sqrt{3}\,arctg\,\frac{2z+1}{\sqrt{3}}\Big] + C.$$

Постоянная C можетъ быть опредѣлена изъ условія, что при $x=0$, $y=y_0$ и $z=0$. Такимъ образомъ получимъ:

$$C = -\frac{2}{3\mu}\sqrt{3}\,arctg\,\frac{1}{\sqrt{3}},$$

и уравненіе кривой можно представить въ видѣ:

$$x = \frac{2}{3\mu}\Big[Log\,\frac{\sqrt{z^2+z+1}}{1-z} + \sqrt{3}\,(arctg\,\frac{2z+1}{\sqrt{3}} -$$

$$-arctg\,\frac{1}{\sqrt{3}})\Big].$$

Но мы раньше еще приняли, что

$$z = \Big[1-\Big(\frac{y_0}{y}\Big)^{3/2}\Big]^{1/3},$$

а потому уравненіе кривой движущихъ давленій будетъ слѣдующаго вида:

$$x = \frac{2}{3\mu}\,F\Big(\frac{y_0}{y}\Big).$$

Множитель $F\left(\frac{y_0}{y}\right)$ заключаетъ одну только перемѣнную $\frac{y_0}{y}$, независящую отъ формы и размѣровъ плотины, а потому его можно вычислить разъ на всегда, давая $\frac{y_0}{y}$ рядъ постепенно возрастающихъ значенiй, начиная съ единицы.

Такимъ образомъ получимъ кривую, которая можетъ служить для любой плотины, если только въ ней питанiе движущаго канала происходитъ вышеуказанннымъ способомъ.

Если абсциссы x этой кривой умножимъ на постоянный коэффицiентъ $\frac{2}{3\mu}$, то получимъ уже абсциссы кривой данной плотины.

Коэффицiентъ $\frac{2}{3\mu}$ можно назвать *характеристическимъ* для данной плотины. Съ увеличенiемъ его уменьшается потеря напора на протяженiи отъ питающаго отверстiя до закрытаго конца канала.

Въ самомъ дѣлѣ:

$$\frac{2}{3\mu}=\frac{1}{3}\sqrt[3]{\frac{\alpha D^5}{2gm^2\sigma^2}}.$$

Разсматривая правую часть этого равенства, мы наглядно видимъ, насколько важно, чтобы дiаметръ канала былъ вполнѣ достаточнымъ, а сѣченiе σ было бы сокращено до minimum'а.

Если принять $\alpha=250$ и $m=0{,}62$, то

$$\frac{2}{3\mu}=1{,}07\sqrt[3]{\frac{D^5}{\sigma^2}},$$

Инженеръ Cuvinot вычислилъ различныя значенiя $F\left(\frac{y_0}{y}\right)$ и составилъ нижеслѣдующую таблицу:

Значенія $\frac{y_0}{y}$ или значенія y, если принять $y_0 = 1$	Соотвѣтств. значенія $F\left(\frac{y_0}{y}\right)$ или абсциссъ общей кривой $x_1 = F\left(\frac{y_0}{y}\right)$	Значенія $x = 6{,}80\,F\left(\frac{y_0}{y}\right)$, вычисленныя для Жоанвил. плотины	Замѣчанія.
1,00	0,00	0,00	Въ каждой точкѣ, опредѣляемой абсциссой x, считаемой отъ закрытаго конца канала, движущее давленіе представляется ординатой y, а движущій моментъ опредѣляется по формулѣ $M = \frac{1}{2}\rho\lambda'^2 y$. Но кривая движущихъ давленій измѣняется по извѣстному закону послѣ закрытія каждаго щита.
1,05	1,267	8,62	
1,10	1,603	10,90	
1,20	1,991	13,54	
1,30	2,267	15,42	
1,40	2,493	16,95	
1,50	2,681	18,23	
1,60	2,791	18,98	
1,80	3,089	21,01	
2,00	3,307	22,49	
2,50	3,732	25,38	
3,00	4,058	27,59	
3,50	4,319	29,37	
4,00	4,556	30,88	
5,00	4,898	33,31	
6,00	5,204	35,39	
7,00	5,454	37,09	
8,00	5,640	38,35	
9,00	5,786	39,34	
10,00	5,955	40,49	
11,00	6,157	41,87	
12,00	6,276	42,68	

Графическое изображеніе моментовъ.

Пользуясь вышеприведенными расчетами, можно очень скоро и просто дать графическое изображеніе моментовъ.

Положимъ, что AB представляетъ длину водослива. Точка B соотвѣтствуетъ закрытому концу верхового канала, а точка A открытому пріемному отверстію (чер. 32).

Прежде всего вычислимъ коэффиціентъ $\frac{2}{3\mu}$ по формулѣ:

$$\frac{2}{3\mu} = 1{,}07 \sqrt[3]{\frac{D^5}{\alpha^2}}.$$

Дадимъ y_0 произвольное значеніе BC и вычислимъ, начиная съ этого значенія, ординаты кривой:

$$x = \frac{2}{3\mu} F\left(\frac{y_0}{y}\right).$$

Дѣлается это очень просто при помощи вышеприведенной таблицы; стоитъ только уже данныя величины $F\left(\frac{y_0}{y}\right)$ умножать на коэффиціентъ $\frac{2}{3\mu}$.

Строимъ далѣе кривую $x = \frac{2}{3\mu} F\left(\frac{y_0}{y}\right)$; пусть это будетъ кривая CC'.

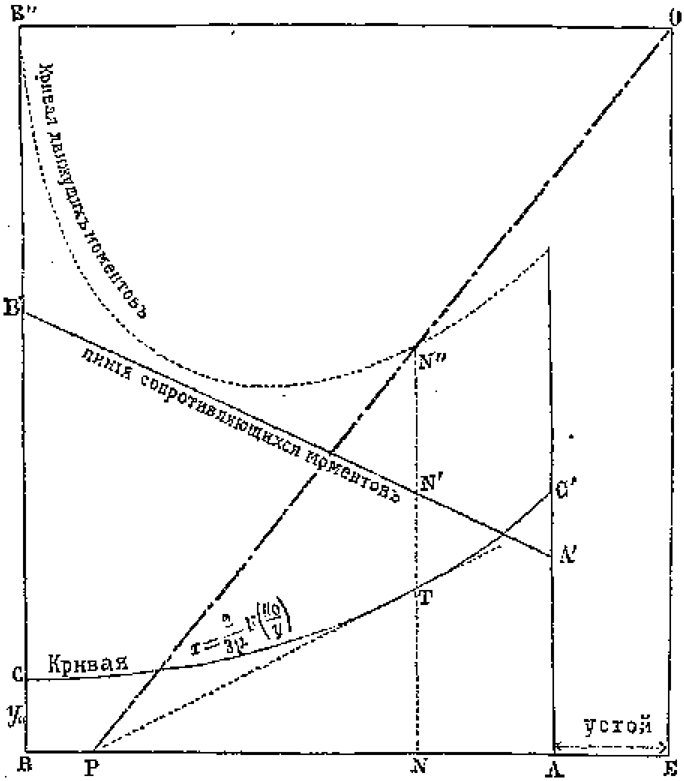
Опредѣляемъ горизонты верхняго и нижняго бьефовъ въ началѣ и въ концѣ закрытія водосливнаго отверстія; величины эти можно считать данными. Находимъ далѣе сопротивляющійся моментъ перваго щита по формулѣ $M = \frac{4}{27} K\rho (H + h)^3$ и послѣдняго щита по формулѣ $M = K\rho H\left(\frac{2}{3} H^2 + Hh + h^2\right)$.

Положимъ, что ординаты AA' и BB' представляютъ эти моменты.

Линія $A'B'$ представляетъ законъ измѣненія сопротивляющагося момента на всемъ протяженіи водослива.

На продолженіи BA откладываемъ длину AE, представляющую длину водопровода въ береговомъ устоѣ; при чемъ ее берутъ нѣсколько больше дѣйствительной величины, чтобы не вводить сопротивленія отъ колѣнъ и суженій живого сѣченія водопровода.

Въ точкѣ E строимъ ординату EO, представляющую движущій моментъ въ этой точкѣ, хотя на про-



Чер. 32.

тяженіи AE и нѣтъ щитовъ. Этотъ движущій моментъ опредѣляется разностью H горизонтовъ верхняго и нижняго бьефовъ и равенъ $\frac{1}{2}\rho\lambda'^2 H$.

Положимъ теперь, что на протяженіи AN щиты уже стоятъ, и найдемъ условія, въ которыхъ находится еще лежащій щитъ въ точкѣ N.

Между точками E и N питающій каналъ не теряетъ воды, а потому линіей движущихъ моментовъ на этомъ протяженіи будетъ прямая, выходящая изъ точки O и касательная къ кривой движущихъ моментовъ на протяженіи NB въ точкѣ пересѣченія съ ординатой NN'. Кривая CC' могла бы служить не только для опредѣленія движущихъ давленій, но и движущихъ моментовъ, такъ какъ между этими двумя рядами величинъ существуетъ нѣкоторое постоянное соотношеніе, и для перехода отъ однихъ къ другимъ достаточно было-бы измѣнить масштабъ высотъ.

Если-бы кривая CC' при измѣненіи масштаба высотъ не измѣняла своего вида, то достаточно было-бы передвинуть ее въ вертикальномъ направленіи параллельно самой себѣ до такого положенія, при которомъ касательная въ T проходила-бы черезъ точку O; тогда мы получили-бы распредѣленіе моментовъ на протяженіи EB.

Но слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что, перемѣщая кривую CC', мы должны въ тоже время ее деформировать такимъ образомъ, чтобы отношеніе $\frac{y_0}{y}$ оставалось постояннымъ; такъ если, напримѣръ, удваиваемъ ординату TN, то слѣдуетъ также удвоить и начальную ординату BC. Изъ такого способа деформированія кривой CC' само собой вытекаетъ слѣдствіе, что въ любой точкѣ касательная измѣняется пропорціонально ординатѣ. Въ этомъ можно убѣдиться аналитическимъ путемъ. Мы уже знаемъ, что

$$\frac{dy}{dx} = \mu \left(y^{3/2} - y_0^{3/2}\right)^{2/3},$$

или

$$\frac{dy}{dx} = \mu y \left(1 - \frac{y_0^{3/2}}{y^{3/2}}\right)^{2/3}.$$

Очевидно, что, если $\frac{y_0}{y}$ — постоянно, то $\frac{dy}{dx}$ измѣняется пропорціонально y. Такимъ образомъ, если въ точкѣ T проведемъ касательную TP къ кривой CC', то, соединивъ точку P съ точкой O, получимъ прямую OP, которая должна быть касательной къ искомой кривой движущихъ моментовъ на протяженіи NB, при чемъ точка касанія N'' лежитъ на пересѣченіи прямой OP и ординаты въ точкѣ N.

Поступая такимъ-же образомъ по отношенію къ другимъ точкамъ, лежащимъ между A и B, получимъ рядъ точекъ подобныхъ N'', соединивъ которыя, получимъ кривую, которая даетъ величины движущихъ моментовъ на всемъ протяженіи водосливнаго отверстія во время его постепеннаго закрытія.

Разность $N'N''$ между движущимъ моментомъ NN'' и сопротивляющимся моментомъ NN' показываетъ для каждаго щита избытокъ или недостатокъ движущей силы.

Такимъ образомъ мы видимъ, что выполненное вышеуказаннымъ способомъ графическое построеніе вполнѣ рѣшаетъ намѣченную нами задачу.

Считаемъ нелишнимъ указать еще на одно обстоятельство, о которомъ мы не затрогивали пока вопроса, чтобы не усложнить вышеприведенныхъ расчетовъ.

Если мы обозначимъ черезъ V объемъ, описываемый контръ-щитомъ при переходѣ отъ горизонтальнаго положенія къ вертикальному, и черезъ n — число секундъ, въ теченіе которыхъ происходитъ этотъ переходъ, то, очевидно, что въ каждую секунду контръщитъ будетъ оставлять за собой пустое пространство объема $\frac{V}{n}$, и на это количество долженъ увеличиваться расходъ верхового канала.

Въ результатѣ, конечно, получается пониженіе напорной линіи въ каналѣ, а слѣдовательно, пониженіе и линіи движущихъ моментовъ, которое становится тѣмъ ощутительнѣе, чѣмъ больше скорость вращенія контръ-щита.

Въ періодъ времени между окончаніемъ движенія одного контръ-щита и началомъ движенія другого— слѣдующаго, кривая движущихъ моментовъ занимаетъ положеніе, соотвѣтствующее вышеуказаннымъ расчетамъ, но съ началомъ движенія новаго контръ-щита она вновь опускается ниже расчетнаго положенія и т. д.

Примѣняя тотъ-же методъ расчета и построеній, который приведенъ выше, можно построить кривую движущихъ моментовъ, введя также и зависимость ея отъ объема, описываемаго контръ-щитомъ. Тогда выяснился-бы вопросъ о количествѣ времени, потребномъ для закрытія водосливнаго отверстія.

Не останавливаясь болѣе на этомъ вопросѣ, мы считаемъ нелишнимъ упомянуть о томъ, что для водосливныхъ отверстій система Desfontaines'a признана самою лучшею всѣми выдающимися французскими гидротехниками.

Содержаніе.

Часть I.

Часть II.

Замѣченныя опечатки.

Страница.	Строка.	Напечатано.	Должно-быть.
28	9 снизу	сторонѣ	стороны
33	4 сверху (конецъ)	$+$	$\times$
—	5 сверху (начало)	$+$	$\times$
35	12 сверху	$\left\{(H+h_0)^{3/2}-h_0^{2/3}\right\}$	$\left\{(H+h_0)^{3/2}-h_0^{3/2}\right\}^{2/3}$
—	3 снизу	наблюдѣнія	наблюденія
44	10 снизу	нэвозможно	невозможно
48	8 снизу	кенечно	конечно
74	5 снизу	внутренныхъ	внутреннихъ
96	5 сверху	$\frac{1000}{9\cos^2\alpha} H^2 (H+3u)$	$\frac{1000}{6\cos^2\alpha} H^2 (H+3u)$
117	3 сверху	горизонтальною	горизонтальную
132	1 снизу	$\frac{\frac{3}{2}}{z+\frac{1^2}{2}+\frac{3}{4}}$	$\frac{\frac{3}{2}}{\left(z+\frac{1}{2}\right)^2+\frac{3}{4}}$