

мов и наиболее употребительных уклонов изменяется в пределах:

для угля ( $i=0,025--0,08$ )  $k_3=0,94$ ,  $k_{3.T}=0,47--0,87$ ;

песчаника ( $i=0,07--0,09$ )  $k_3=0,76$ ,  $k_{3.T}=0,48--0,61$ ;

для алюминиевой стружки 0--25 мм ( $i=0,01--0,02$ )  $k_3=0,92$   $k_{3.T}=0,25--0,45$

для чугунной стружки 0--10 мм ( $i=0,02--0,03$ )  $k_3=0,75$ ,  $k_{3.T}=0,10--0,15$ ;

для стальной стружки 0--25 мм ( $i=0,02--0,05$ )  $k_3=0,72$ ,  $k_{3.T}=0,10--0,20$ .

## Л и т е р а т у р а

1. Богомолов А.И., Михайлов К.И. Гидравлика. М., 1972.
2. Тютиков Г.Т., Руднев Г.С., Куприн А.И. Лабораторные и промышленные исследования местных сопротивлений при безнапорном гидротранспорте. "Изв. вузов. Горный журнал", 1962, № 6.
3. Куприн А.И. Уменьшение местных гидравлических сопротивлений при безнапорном гидротранспорте угля. "Гидравлическая добыча угля", 1969, 4.

А.И. Куприн, Е.К. Седых,  
А.М. Тихонцов, В.Г. Янковец

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ БЕЗНАПОРНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА КРУПНОКУСКОВЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Безнапорный гидротранспорт является одним из основных звеньев гидромеханизации трудоемких и тяжелых процессов и используется, например, для удаления в отвалы грунта от места его выемки при строительстве гидротехнических сооружений, транспортировании металлической стружки и т.д.

Проблеме моделирования потоков, перемещающих твердые сыпучие материалы, посвящен ряд исследований, однако до сего времени нет четких рекомендаций по определению минимальных размеров модели, при которых масштабным эффектом можно пренебречь.

В настоящей статье описана разработанная авторами методика определения критического масштаба модели  $\lambda_{кр.}$ , начиная с которого процесс безнапорного гидротранспорта будет

автомодельным. В качестве примера для песчаника и стальной стружки определены минимальные размеры модели  $\lambda_{кр}$ .

Опыты проводились на моделях, имеющих различные размеры, при этом гранулометрический состав перемещаемых сыпучих материалов подготавливался с соблюдением законов геометрического подобия в соответствии с масштабами моделей. Если поток на первой самой малой модели имеет ширину

$B_1(\lambda_1=1)$ , глубину  $h_1$  и крупность перемещаемого материала

$a-c$ , то поток на второй модели имеет ширину  $\lambda_2 B_1$ , глубину  $\lambda_2 h_1$ , а крупность перемещаемого материала будет  $\lambda_2 a-c$  и т.д., причем  $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n$ .

В опытах на моделях использовался один и тот же перемещаемый материал, что автоматически обеспечивало равенство плотности на модели и в натуре, коэффициента трения, критерия оценки формы частиц [1, 2]. В результате опытов получают основные зависимости удельного расхода  $q$  воды от масштаба модели при предельном нагружении потока, а также дополнительного уклона  $\Delta i$ , необходимого для определения скорости движения пульпы. Получив такие зависимости  $q = f(\lambda)$  и  $\Delta i = f(\lambda)$ , нетрудно пересчитать результаты модели на натурные условия.

Для получения зависимостей  $q = f(\lambda)$  и  $\Delta i = f(\lambda)$  авторами были проведены опыты на разномасштабных моделях. В качестве перемещаемого материала использовался дробленый песчаник, имеющий различную крупность, и стальная стружка в смеси от всех типов станков. Опыты проводились на установке, устройство которой заключается в следующем. Самовсасывающий насос 4 типа СВМ (рис. 1) подает воду из отстойника 5 по трубопроводу 3 в напорный бак 2, имеющий устройство для поддержания постоянного уровня. Это устройство состоит из сливной камеры 4 и трубы 13 диаметром 150 мм, через которую переливается вся излишняя вода из бака. Кроме этого, в сливной камере имеется сигнальная трубка 11, через которую при достижении определенного уровня в баке вода сливается в приемную воронку и далее в отстойник 5. В бак подается заведомо больше воды, чем из него вытекает по трубопроводу 1. Для опорожнения напорного бака 4 после окончания работы открывается задвижка 12 и вода по трубе 6 сливается в отстойник. Бак является аккумулялирующей емкостью воды, необходимой для проведения трех-четырех опытов, после чего снова включается насос для его заполнения.

Таким образом, все опыты выполнялись при выключенном насосе, что исключало вибрацию фундамента, а следовательно,

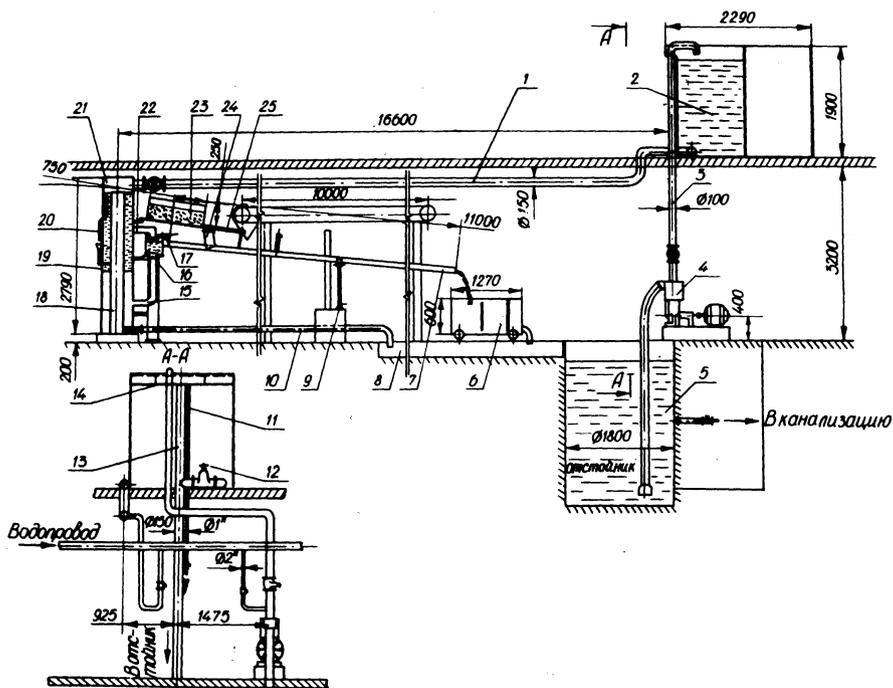


Рис. 1. Экспериментальная установка по определению основных параметров безнапорного гидротранспорта: 1,3—трубопровод; 2—напорный бак; 4—самовсасывающий насос; 5—отстойник; 6—мерный бак; 7—желоб; 8—канал; 9—винтовой домкрат; 10,13,15,18—трубы; 11—сигнальная трубка; 12—задвижка; 14—камера; 16—клапан; 17—рукоятка; 19—перегородка; 20—трубка; 21—колонна; 22—патрубок; 23—бункер; 24—лоток; 25—наклонная площадка.

и желоба в процессе эксперимента. По трубопроводу 1 вода подается в колонну 21, предназначенную для обеспечения постоянства расхода воды на желоб. Колонна представляет собой трубу диаметром 520 мм, разделенную по высоте на две части с помощью перегородки 19. Постоянство расхода воды обеспечивается поддержанием неизменного напора в течение всего времени проведения эксперимента и за счет постоянного диаметра диафрагмы, смонтированной на конце сливного патрубка 14. Излишняя вода, подаваемая в колонну 21, сливается через трубу 10 и канал в отстойник. Для визуального наблюдения за постоянством напора служит сигнальная трубка

20. Уровень трубки 20 располагается на 2 мм ниже, чем уровень трубы 18. Вода из патрубка 22 попадает в бак-успокоитель и из него в желоб 7, мерный бак 6 и по каналу в отстойник. В опытах применялись желоба съемные, стальные, прямоугольного сечения шириной от 34 до 275 мм и длиной от 2 до 11,5 м. Желоб одним своим концом шарнирно прикреплен к бак-успокоителю и имеет вторую опору, регулирующую по высоте с помощью винтового домкрата 9. Таким образом, уклон желоба может изменяться в пределах 0,00--0,135. Изменение расхода воды, подаваемой на желоб, обеспечивается за счет сменных диафрагм, выполненных из нержавеющей стали и имеющих калиброванный диаметр. Диаметры диафрагм составляют 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 мм.

Для загрузки твердого материала в желоб был использован бункер 22, который представляет собой металлический ящик без дна. Этот бункер располагался на наклонной площадке 24, к которой крепился лоток 23. При движении бункера с постоянной скоростью материал равномерно загружался через лоток в желоб. Конструкция лотка обеспечивает одинаковое направление векторов скоростей воды и твердых частиц в момент загрузки. Для возможности мгновенного прекращения подачи воды на желоб в момент отсечки служит клапан 16, приводимый в движение рукояткой 17. При открытии клапана вода из бака-успокоителя сливается по трубе 15.

Кроме этого, для загрузки твердого материала в поток жидкости использовался ленточный конвейер длиной 10 м. Загружаемый материал располагался равномерным слоем, скорость движения ленты была постоянной. Степень интенсивности загрузки обеспечивалась за счет изменения площади поперечного сечения материала на ленте. Строгое постоянство поперечного сечения материала по всей длине ленты, заданного для каждой серии опытов, обеспечивалось с помощью специального шаблона.

Для измерения расхода воды объемным методом служит мерный бак 6, имеющий водомерное стекло, перегородку с пробкой. Максимальная емкость мерного бака составляет 0,57 м<sup>3</sup>, время заполнения фиксировалось секундомером.

Опыты проводились в следующем порядке: вначале желоб устанавливался с определенным уклоном, затем в бункер питателя загружалась порция исследуемого материала необходимого веса. При помощи задвижки осуществлялась подача заданного количества воды в единицу времени на желоб. В процессе определения расхода воды с помощью мерного бака измерялась также глубина потока воды шпигельмасштабом, имеющим нони-

ус с ценой деления 0,1 мм. Для измерения глубины потока, имеющего гладкую свободную поверхность, наконечник шпиген-масштаба применяется в виде острой иглы, в случае же бурных потоков удобно пользоваться наконечником в виде лопатки шириной 4--5 мм.

При каждом уклоне и расходе воды измерялась скорость движения отдельных частиц исследуемых материалов. Затем материал из бункера разгружался равномерно в поток чистой воды и наблюдался характер движения пульпы. Транспортирующая способность по твердому стоку вычислялась как частное от деления объема или веса материала за время его движения по желобу, измеряемое секундомером.

Секундомер при этом включался, как только первая группа частиц твердого материала проходила полностью желобчатый став, и выключался, когда последние частицы материала проходили тот же став. Такой способ выяснения транспортирующей способности позволяет осреднять значение  $Q_T$  в процессе одного опыта, что является безусловным его преимуществом. Для нахождения максимально возможной транспортирующей способности каждый опыт при определенном уклоне и расходе повторялся 3--5 раз с постепенным увеличением нагрузки по твердому стоку, пока не было установлено минимально возможное время движения всего сыпучего материала, разгруженного из бункера, по желобу, при этом еще сохраняется надежное транспортирование твердых частиц.

Для нахождения действительной консистенции пульпы и других параметров потока делались отсечки пульпы. Для этого прекращалась подача на желоб, отсекался участок потока пульпы длиной 1 и в тот же момент под желоб подставлялся мерный бак. Вся пульпа, находящаяся на желобе, попадала в мерный бак. Объемное содержание жидкой и твердой фазы в пульпе находим с помощью специально изготовленного измерительного сосуда.

Описанный метод определения транспортирующей способности открытого потока хорошо зарекомендовал себя на протяжении многолетних исследований [4]. При его применении, однако, очень важно выполнить следующие четыре основных требования:

- 1) желоб должен иметь достаточную длину; 2) загрузка твердого материала в поток транспортирующей жидкости равномерная; 3) нагружение потока предельное; 4) продолжительность опытов достаточная.

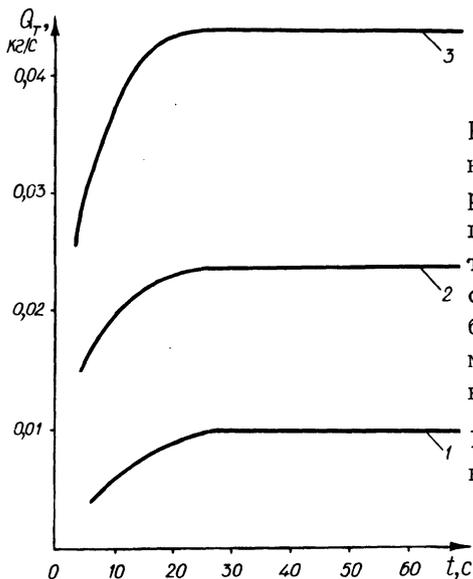


Рис. 2. Результаты определения зависимости транспортирующей способности открытого потока от времени загрузки твердым материалом (желоб стальной шириной 62,5 мм, глубина потока воды  $h_B = 7$  мм, материал — стальная стружка крупностью  $d_{cp} = 6,4$  мм):  
1, 2, 3 — уклон желоба, соответственно  $i = 0,07; 0,09; 0,11$ .

Необходимость выполнения первого требования рассмотрена нами ранее [1]. Целесообразность выполнения второго и третьего разъяснения не требует, а необходимость выполнения последнего требования диктуется следующими обстоятельствами. Время движения материала по желобу можно разделить на три периода: I период — от начала загрузки до того момента, когда первые частицы переместились в мерный бак; II период — установившееся движение материала по желобу; III период — от момента окончания выгрузки материала из бункера до того момента, когда последняя группа частиц пройдет весь желоб.

В I и III периодах имеет место неустановившееся движение, причем количество материала по всей длине желоба непрерывно изменяется, в I периоде это количество увеличивается, а в III уменьшается. Как в I, так и в III периодах, имеет место неполное использование энергии водного потока.

Авторы провели предварительные опыты по определению транспортирующей способности потока в зависимости от времени загрузки твердого материала. Результаты исследований (рис. 2) показывают, что для постоянных условий эксперимента существует минимальное время загрузки  $t_{min}$ , после которого транспортирующая способность потока не изменяется. В последующих опытах время загрузки твердого материала в поток жидкости всегда было больше, чем  $t_{min}$ .

В табл. 1 указаны размеры поперечных сечений потоков, а также крупность сыпучего материала, используемого на каждой из моделей.

Все желоба были выполнены из стального проката, не имели стыков, порогов, сужений и расширений; коэффициент шероховатости был одинаков для всех желобов и равен 0,01. Предельный уклон каждой модели изменялся от 0,05 до 0,13; расход воды колебался от 0,02 до 11,2 л/с.

Таблица 1

Масштаб моделирования	$\lambda_1=1$	$\lambda_2=1,8$	$\lambda_3=3$	$\lambda_4=4$	$\lambda_5=5,2$	$\lambda_6=8$
Ширина желоба В, мм	34	62,5	100	135	175	275
Глубина потока воды $h_B$ , мм						
до введения твердых частиц	1,6	3,0	4,8	6,5	8,4	13,0
после введения	5,4	10	16	21,6	28	43,0
Крупность частиц а--с, мм	1,5-3	26-5,4	4,5-9	6-12	8-16	12-24
	3-6	5,4-11	9-18	12-24	16-31	24-48
	5-10	9-18	15-30	20-40	26-52	40-80
	8-12	14-22	24-36	32-48	42-62	-
	0-12	0-22	0-36	0-48	0-62	-

Число Рейнольдса для потоков транспортирующей жидкости равнялось 730--50000:

$$Re = \frac{v_B R_B}{\nu}$$

Число Фруда было всегда больше 1, а значит, поток был бурным;

$$Fr = \frac{v_B^2}{g h_B}$$

где  $v_B$  -- скорость потока воды до введения твердых частиц;  $R_B$  -- гидравлический радиус сечения потока воды;  $\nu$  -- вязкость воды.

Все опыты проводились при стационарном режиме движения жидкости; уклон желоба, расход воды, интенсивность загрузки материала в поток были стабильными.

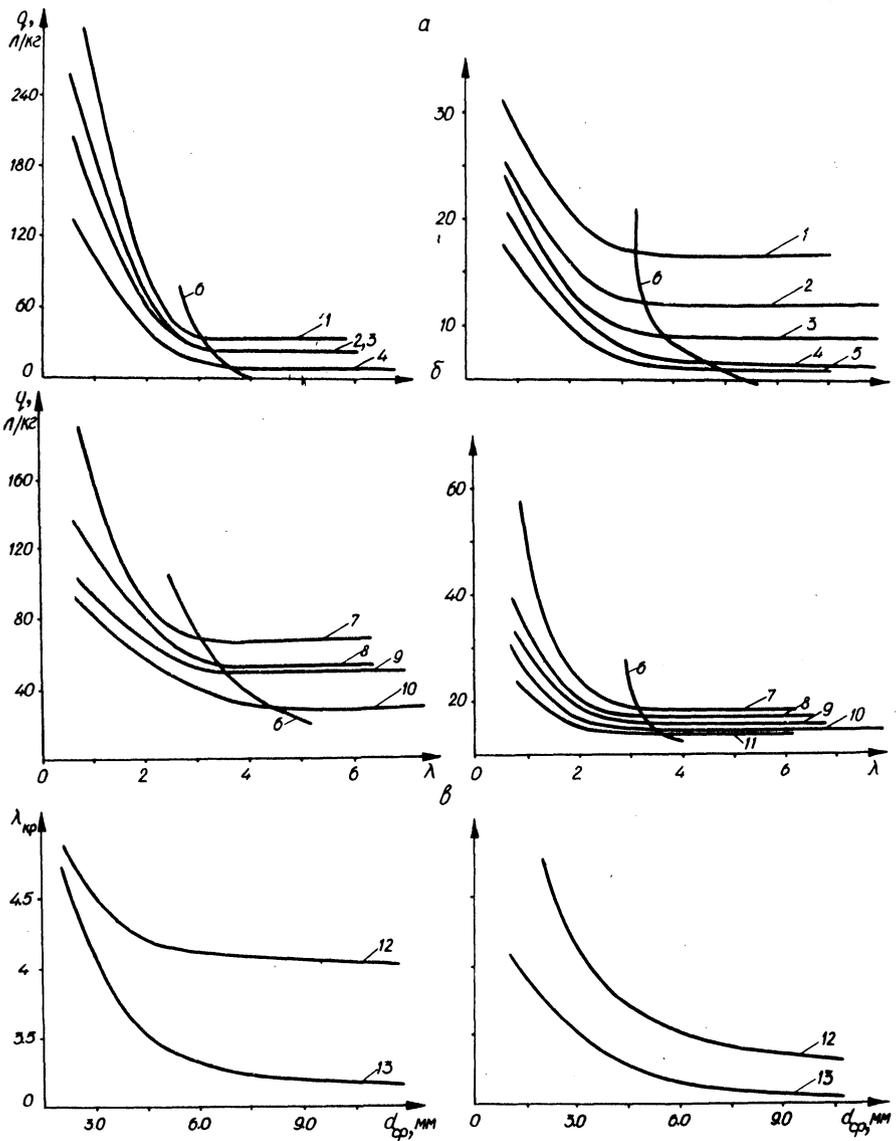


Рис. 3. Зависимости удельного расхода воды от масштаба моделирования и крупности перемещаемого материала (а, б), критического масштаба моделирования от крупности материала (в) при безнапорном гидротранспорте по стальным желобам: 1—5 и 12— $i=0,09$ ,  $h=1,6$  мм при  $\lambda_1=1$ ; 7—11 и 13— $i=0,05$ ,  $h=5,4$  мм при  $\lambda_1=1$ ; 1 и 7— $d_{cp}^B=10$  мм; 2 и 8—7,5; 3 и 9—4,5; 4 и 10—2,2; 5 и 11—рядовой материал; 6—линия критического моделирования (здесь и на рис. 4 зависимости слева—для стальной стружки, справа— для песчаника).

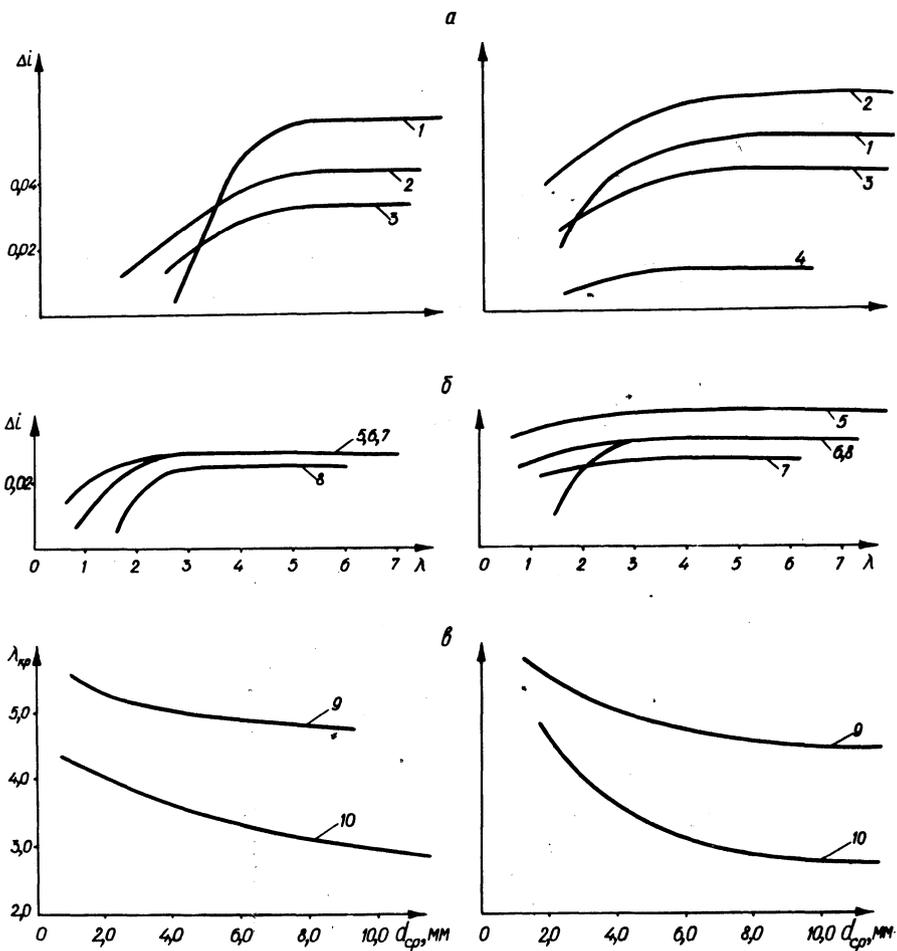


Рис. 4. Зависимости дополнительного уклона от масштаба моделирования и крупности перемещаемого материала (а,б), критического масштаба моделирования от крупности материала (в) при безнапорном гидротранспорте по стальным желобам: 1,4 и 9 —  $i=0,09$ ,  $h_1 = 1,6$  мм при  $\lambda_1 = 1$ ; 5—8 и 10 —  $i=0,05$ ,  $h_1 = 5,4$  мм при  $\lambda_1 = 1$ ; 1 и 5 —  $d_{ср}^1 = 2,2$  мм; 2 и 6 — 4,5; 3<sup>в</sup> и 7 — 7,5; 4 и 8 — 10.

Результаты опытов (рис. 3) показывают, что на малых моделях удельный расход воды  $q$  для песчаника и стальной стружки значительно больше, чем на моделях, имеющих большой масштаб. Это можно объяснить следующим образом. Гидравлический радиус при  $\lambda_n/\lambda_1 > 1$  на малой модели в  $\lambda_n/\lambda_1$  раз меньше, чем на большой; относительная шероховатость при  $\lambda_n > \lambda_1$  на малой модели, в  $\lambda_n/\lambda_1$  раз больше, чем на большой; во столько же раз больше и точек контакта частиц с дном желоба. Точки контакта частиц находятся в пограничном слое, скорость которого близка к нулю. Суммарная поверхность  $S$  частиц, находящихся в 1 кг твердого материала на малой модели в  $\lambda_n/\lambda_1$  раз больше, чем на большой, что вызывает на малой модели большее сопротивление движению жидкости сквозь скелет твердых частиц.

При увеличении масштаба модели указанные факторы в меньшей мере оказывают влияние на удельный расход воды и при определенном масштабе удельный расход воды и дополнительный уклон становятся постоянными.

Полученные результаты позволяют определить границы масштабного эффекта при моделировании. Для условий безнапорного гидротранспорта стальной стружки и дробленого песчаника можно считать, что результаты по определению  $q$  и  $\Delta i$ , полученные на модели шириной 175 мм, могут быть пересчитаны по критерию Фруда на потоки сколь угодно большого масштаба. Явление масштабного эффекта на больших уклонах  $i$  и при больших расходах  $Q$  исчезает быстрее, чем для малых значений  $i$  и  $Q$ . Удельный вес частиц и их форма на масштабный эффект влияют незначительно.

Исследования показали также, что масштабный эффект определяется не только размерами модели желоба, но и крупностью перемешиваемого материала. Масштабный эффект для частиц малой крупности проявляется более существенно, чем для частиц большой крупности (рис. 4). На рис. 4, а, б показано изменение удельного расхода воды от масштаба моделирования, а на рис. 4, в — зависимость критического значения масштаба моделирования от крупности перемешиваемого материала. Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением крупности критический масштаб моделирования  $\lambda_{кр}$  уменьшается.

#### Л и т е р а т у р а

1. Куприн А.И., Цейтлин Б.Е., Тихонцов А.М. Экспериментальное определение основных параметров безнапорного

гидротранспорта на стендовой лабораторной установке.-- "Изв. вузов. Горный журнал", 1970, № 2. 2. Куприн А.И., Тихонцов А.М., Цейтлин Б.Е. Расчет безнапорного гидротранспорта металлической стружки.-- "Механизация и автоматизация производства", 1969, № 12. 3. Куприн А.И., Чэн-да-джун. Влияние коэффициента трения на транспортирующую способность потока при безнапорном и напорном гидротранспорте. -- "Изв. вузов. Горный журнал", 1960, № 10.

А.Ф. Попов

### РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНДАМЕНТА С ПОЛОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОДОШВОЙ НА СДВИГ С ПОВОРОТОМ

Существующий метод определения устойчивости сооружений на сдвиг предполагает совпадение линий действия активной сдвигающей силы  $T$  и равнодействующей  $R_r$ , параллельных ей реактивных касательных напряжений  $\tau$  и соответственно поступательное перемещение сооружения по направлению силы  $T$ .

Вместе с тем для многих сооружений возможно нарушение устойчивости в форме сдвига с поворотом вокруг некоторого полюса. При этом напряжения  $\tau$  приобретают разные направления, а несущая способность основания оказывается ниже, чем при поступательном сдвиге. Нарушение устойчивости сооружения в форме сдвига с поворотом возникает при внецентренном приложении сдвигающей силы  $T$ , неравномерном распределении нормальных напряжений в основании, а также в тех случаях, когда поступательному сдвигу препятствует неподвижная опора и т.п.

Аналитические зависимости для расчета устойчивости сооружений с монолитной прямоугольной подошвой на сдвиг с поворотом даны в работе [1]. Зависимости эти следующие:

$$\int_F \tau \sin \psi \, dF = 0; \int_F \tau \cos \psi \, dF = R_r; \int_F \tau r \, dF = R_r(m+e). \quad (1)$$

Они дают возможность определить положение полюса поворота (координаты  $m, n$ ) при сдвиге и величины предельных реактивных сил  $R_r$ , т.е. коэффициент устойчивости:

$$k = R_r / T. \quad (2)$$