

УДК 622.734:622.76

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ И ВЗВЕСЕЙ

В.В.Надршин<sup>1</sup>, В.В.Мельников<sup>2</sup>, И.А.Огнев<sup>3</sup>, А.Н.Роговой<sup>4</sup>

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Статья посвящена исследованиям гидродинамики движения жидкости и взвесенесущего потока на шлюзах для оптимизации технологических параметров процесса извлечения примесей. Выполнен анализ требований гидравлического моделирования безнапорных потоков на шлюзах.

**Ключевые слова:** моделирование; критерии гидродинамического подобия; режимы движения жидкостей.

## STUDY OF VORTEX FLOWS OF FLUIDS AND SUSPENSIONS

V.V. Nadrshin, V.V. Melnikov, I.A. Ognev, A.N. Rogovoy

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074.

The article is devoted to the research of fluid motion hydrodynamics and the suspension-carrying flow on sluices for the optimization of technological parameters of the impurity extraction process. The analysis of the requirements for the hydraulic modeling of free flows on the sluices is performed.

**Key words:** modeling; criteria of hydrodynamic similarity; modes of fluid motion.

Проблема очистки природных и сточных вод с каждым годом становится всё более актуальной. Для ее решения разрабатываются новые технологии, основывающиеся на законах гидродинамики водных потоков, поэтому исследование вихревых течений жидкостей и взвесей представляет большой научный интерес [1, 2].

При движении воды в открытых руслах, шлюзах, аппаратах и оборудовании подготовки и очистки природных вод и стоков основными действующими силами являются силы трения и силы тяжести. Подобие сил тяжести имеет место при соблюдении в натуре и модели равенства чисел Фруда, т.е.

$$Fr = \frac{v^2}{g \ell} = \text{idem}.$$

Подобие сил трения принято считать обеспеченным при равенстве в модели и в натуре чисел Рейнольдса, т.е.  $Re = \frac{v \ell}{\nu} = \text{idem}$  при соблюдении ус-

ловия  $H_H/H_M = L_{HM}$ , где  $H_H$  и  $H_M$  – суммарные потери напора на трение в натуре и на модели. Это уравнение можно записать в виде [3]:

$$\frac{\lambda_H \frac{l_H}{d_H} \frac{v_H^2}{2g}}{\lambda_M \frac{l_M}{d_M} \frac{v_M^2}{2g}} = L.$$

Здесь  $\nu$ ,  $\nu_H$ ,  $\nu_M$  – соответственно средняя скорость потока, средняя скорость потока в натуре и модели;

$l_H$ ,  $l_M$ ,  $d_H$ ,  $d_M$  – соответственно линейные размеры в натуре и модели;

$\lambda_H$ ,  $\lambda_M$  – соответственно коэффициент гидравлического трения в натуре и модели.

Одновременное соблюдение указанных условий возможно лишь при использовании в модели жидкости иной вязкости, чем в натуре, что практически неосуществимо, поэтому второе условие соблюдается редко.

К вопросу о моделировании безнапорных потоков можно также подойти, рассматривая условия подобия сил трения в форме уравнения

$$L^{3/2} = 1 + \nu_H \frac{k_H - Lk_M}{68\nu},$$

где  $k_H$ ,  $k_M$  – шероховатость стенок шлюзов в натуре и модели,  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, которое для случая движения в открытых руслах целесообразно представить в виде  $C = \text{idem}$ , т.е. для всех подобных между собой процессов, где определяющими являются силы трения, должно сохраняться равенство  $C$  – коэффициента Шези.

Для широкого прямоугольного русла справедливо соотношение

$$i = \frac{v^2}{C^2 h} = Fr \frac{g}{C^2} \quad \text{при} \quad \frac{Fr}{i} = \text{idem}.$$

Подобие обеспечивается при соблюдении условий

$$Fr = \text{idem}, C = \text{idem}, i = \text{idem}.$$

При этом достаточно обеспечить любые два условия, чтобы третье соблюдалось автоматически. При

<sup>1</sup>Надршин Владимир Вагизович, доцент, тел.: (3952)585313, e-mail: nadrshin@istu.edu

Nadrshin Vladimir Vagizovich, associate professor, tel.: (3952) 585313, e-mail: nadrshin@istu.edu

<sup>2</sup>Мельников Василий Викторович, аспирант, e-mail: mvv999@mail.ru

Melnikov Vasily Viktorovich, postgraduate, e-mail: mvv999@mail.ru

<sup>3</sup>Огнев Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент.

Ognev Igor Anatolievich, Candidate of technical sciences, associate professor.

<sup>4</sup>Роговой Александр Николаевич, аспирант, e-mail: bwc9501197713@rambler.ru

Rogovoy Alexander Nikolaevich, postgraduate, e-mail: bwc9501197713@rambler.ru

моделировании открытых русел и шлюзов с неразрываемым ложом необходимо создать в модели тот же уклон, что и в натуре, а шероховатость модели и её масштаб подобрать таким образом, чтобы число Фруда на модели было равно числу Фруда в натуре. При этом будет обеспечено равенство коэффициентов Шези модели и натуре. В руководствах рекомендуется устанавливать шероховатость модели на основе известных квадратичных формул Павловского, Маннинга, Базена и др. Это, однако, допустимо лишь для случая, когда не только в натуре, но и на модели существует квадратичный закон сопротивления, что имеет место лишь в редких случаях (при моделях весьма крупного масштаба, больших уклонах и значительных шероховатостях модели). При относительно малых числах Рейнольдса и специальных типах шероховатости стенок (в большинстве случаев движения воды на моделях, особенно при сравнительно малых масштабах последних), как показывают данные систематических опытов, зависимость коэффициента  $C$  от числа Рейнольдса и, следовательно, от гидравлического уклона проявляется более значительно. В некоторых случаях влияние уклона имеет место и в натуральных водотоках. В связи с этим расчёт моделей следует вести по формулам, учитывающим влияние уклона на коэффициент Шези.

После потери устойчивости движение взвешенного водного потока становится турбулентным. При таком движении наблюдается продольное движение вращающихся вокруг мгновенных центров вихрей при, как считается, хаотическом изменении гидродинамических величин.

Первая характеристика потока – степень (интенсивность) турбулентности – это отношение местных скоростей  $u'_x, u'_y, u'_z$  либо к осреднённой по времени местной скорости, либо к осреднённой по сечению потока скорости.

Вторая характеристика потока – масштаб турбулентности – определяет в выбранном направлении средний размер области связанных между собой пульсационных составляющих скорости. Если за основное выбрано направление потока с характерной скоростью  $u_x$  вдоль оси  $Ox$ , продольный масштаб турбулентности определяется коэффициентом корреляции  $R$  между пульсационными составляющими  $u'_{x1}$  и  $u'_{x2}$  скоростей для точек, лежащих на оси  $Ox$  на расстоянии  $l = x_2 - x_1$  друг от друга. Кроме продольного масштаба турбулентности, вычисляют поперечный масштаб турбулентности при тех же скоростях пульсаций для двух точек, расположенных на осях  $Oy$  и  $Oz$ .

Третьей характеристикой турбулентности является функция  $F(n)$  распределения кинетической энергии пульсаций по частотам  $n$  этих пульсаций во времени. Величина  $F(n)dn$  определяет ту часть отнесённой к единице массы общей осреднённой энергии пульсационного движения, которую составляет энергия пульсаций с частотой, находящейся в диапазоне  $n...n+dn$ .

Интенсивность и масштабы турбулентности экспериментально определялись в различных потоках, особенно большое внимание уделялось пограничным слоям. Согласно экспериментам, в пограничном слое на пластине преимущественные значения частот достигают 50 Гц и с увеличением числа Рейнольдса могут снижаться до 20 Гц, в то время как вне пограничного слоя определялись значения частот, равные 100 Гц. При этом необходим учет особенностей обтекания жидкостью частицы, а также учёт изменения и определения величины коэффициента сопротивления частицы при её движении в жидкости.

Зависимость коэффициента сопротивления частицы от числа Рейнольдса имеет сложный вид. В первом приближении при малых числах Рейнольдса

$$C_D = \frac{24}{Re}, \text{ при очень больших числах Рейнольдса}$$

$$C_D \approx 0.45.$$

Скорость равномерного падения частицы в покоящейся жидкости или её гидравлическая крупность определяется из формулы

$$w = \left( \sqrt{\frac{4}{3}g} \right) \sqrt{\frac{d(\rho_{ТВ} - \rho_{Ж})}{C_D \rho_{Ж}}},$$

где  $\rho_{ТВ}$  – плотность твёрдого тела;  $\rho_{Ж}$  – плотность жидкости;  $C_D$  – коэффициент сопротивления твёрдой частицы.

$$a = \sqrt{(\rho_{ТВ} - \rho_{Ж}) / \rho_{Ж}} \quad \text{с учётом вышеотмеченного при}$$

$$v - \text{в см}^2/\text{с} \quad w = 52 \frac{a^2 d^2}{v + a^{3/2}}.$$

Выполним анализ основных зависимостей гидравлического расчёта движения гидросмесей в желобах.

При равномерном течении взвешенного потока расход гидросмеси  $Q$ , глубина  $h$ , форма и размеры поперечного сечения  $\omega$  остаются постоянными по длине потока. Уклон свободной поверхности жидкости  $I$  равен уклону дна шлюза  $i$ .

Алгоритм расчёта [3]:

1. При расчёте турбулентных течений в открытых желобах среднюю скорость течения находят по формуле Шези:  $v = C\sqrt{Ri}$ , где  $v$  – средняя скорость, м/с;  $R$  – гидравлический радиус, м;  $i$  – уклон дна шлюза;  $C$  – коэффициент Шези, м<sup>0.5</sup>/с, связанный с коэффициентом гидравлического трения  $\lambda$  зависимостью  $\lambda = 8g/C^2$ ;  $\varepsilon$  – приведённая линейная шероховатость (мм);  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости (гидросмеси), для холодной воды  $\nu = 1.10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения. При значении критерия зоны турбулентности  $\varepsilon\sqrt{Ri} \geq 0,04$  можно пользоваться формулой  $C = 20 \lg \frac{R}{\varepsilon}$ .

2. Расход гидросмеси определяется по формуле Шези:  $Q = \omega C \sqrt{R \times i}$ .

3. Уклон и падение шлюза по длине  $\ell$  (потери напора) определяются по формулам

$$i = \frac{v_2}{C^2 R} = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} = \frac{Q^2}{K^2};$$

$$\Delta z = i \times \ell = \frac{Q^2}{\omega C^2 R} \ell = \frac{Q^2}{K^2} \ell.$$

4. Расходная характеристика (модуль расхода):

$$K = \omega C \sqrt{R} = \frac{Q^2}{K^2} \ell.$$

5. Скоростная характеристика (модуль скорости):

$$W = C \sqrt{R} = \frac{v}{\sqrt{i}}.$$

дика. Если в опытах А.И.Лосиевского внутренние течения определялись с помощью краски нигрозина, отвечающей необходимым требованиям для спокойных потоков ( $Fr < 0,24$ ), то в данном случае использовалась масляная чёрная краска. Она наносилась на дно желоба, и формирование следов от движения водных струй происходило относительно медленно. Вследствие этого имелась возможность наблюдать и фотографировать следы во времени.

Чтобы масляная краска имела необходимую подвижность, в неё добавлялся керосин. опыты проводились в желобе прямоугольного сечения длиной 240 см, шириной 8,5 см с успокоительной коробкой на верхнем конце. Угол наклона желоба изменялся от  $0^\circ 10'$  до  $5^\circ 40'$ , глубина - от 0,4 до 2,8 см, средняя скорость - от 13,4 до 250 см/с, число Рейнольдса - от 1070 до 65000 и число Фруда - от 0,24 до 26 (таблица).

#### Условия и результаты проведения опытов по выявлению вихревых шнуров в водном потоке прямолинейного желоба

Число Фруда	Число Рейнольдса	Глубина, см	Средняя скорость потока, см/с	Угол наклона желоба	Схема вихревых шнуров (рис. 2)
0,21	2600	1,50	17,5	$0^\circ 10'$	а
0,23	1070	1,50	13,4	$0^\circ 10'$	б
1,02	4700	2,80	16,7	$0^\circ 10'$	в
2,20	4600	1,00	46,0	$1^\circ 45'$	г
3,20	2600	0,60	43,6	$1^\circ 45'$	д
10,60	4710	0,60	78,6	$5^\circ 40'$	е
11,00	2600	0,40	65,2	$5^\circ 40'$	ж
23,00	36000	1,80	200,0	$6^\circ$	з
26,00	65000	2,50	250,0	$6^\circ$	и

6. Средняя скорость течения воды в шлюзе должна лежать в пределах  $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ , где  $v_{\max}$  – максимальная неразрывающаяся скорость;  $v_{\min}$  – минимальная незаиливающая скорость. Если  $d$  – диаметр (средний) твёрдых частиц, слагающих дно шлюза, максимальную неразрывающую скорость потока определяют по формуле И.И.Леви:

$$v_{\max} = 3 \sqrt{g d} \lg \frac{R}{7 d},$$

где  $d$  – средний диаметр частиц, покрывающих дно шлюза. Минимальная незаиливающая скорость  $v_{\min} = 0,5 \sqrt{R}$ , где  $R$  – гидравлический радиус, м.

Внутренние поперечные течения присущи водному потоку как с ламинарным, так и с турбулентным режимами движения. Исследования показывают, что внутренние течения не являются беспорядочными, а отвечают определенным, не вполне ещё понятным законам движения. Деление потока на тела вращения эффективнее при большем отношении ширины потока к его глубине и не зависит или слабо зависит от числа Рейнольдса.

Изучена зависимость структуры внутренних течений от числа Фруда, характеризующего динамику водного потока. Объектом исследования были «спокойные», «бурные» и переходные потоки, для изучения которых разработана и применена следующая мето-

Глубина потока замерялась специально «сконструированным» глубометром (на основе микрометра). Работа его основана на том, что вертикальная подвижная игла с помощью точного и несложного механизма, опускаясь вниз, фиксирует поверхность водного потока. В момент касания иглой воды зажигается неоновая лампочка, результат замера снимается со шкалы, где цена малого деления 0,1 мм. Средняя скорость определялась с учётом глубины и расхода водного потока.

Получено, что водный поток при числах Фруда в пределах 0,24-26 оставляет на дне прямолинейного желоба (покрытом слоем краски) параллельные следы (рис. 1). Эти следы направлены вдоль желоба, в ряде случаев между чёткими параллельными следами наблюдались менее чёткие или под углом к ним - дополнительные следы в виде дужек или отдельных черточек (рис. 2). Если обратиться к результатам опытов А.И.Лосиевского и М.В.Потапова, то можно отметить, что у них транспортирование и отложение наносов осуществлялось всегда вдоль и между внутренними течениями (поперечными циркуляциями), куда влекаемые наносы доставляются косыми донными течениями спокойных потоков. В данном случае роль наносов выполняет краска, хорошо фиксируя картину размыва. Объяснить полученные следы можно только наличием в потоке внутренних течений, которые смы-

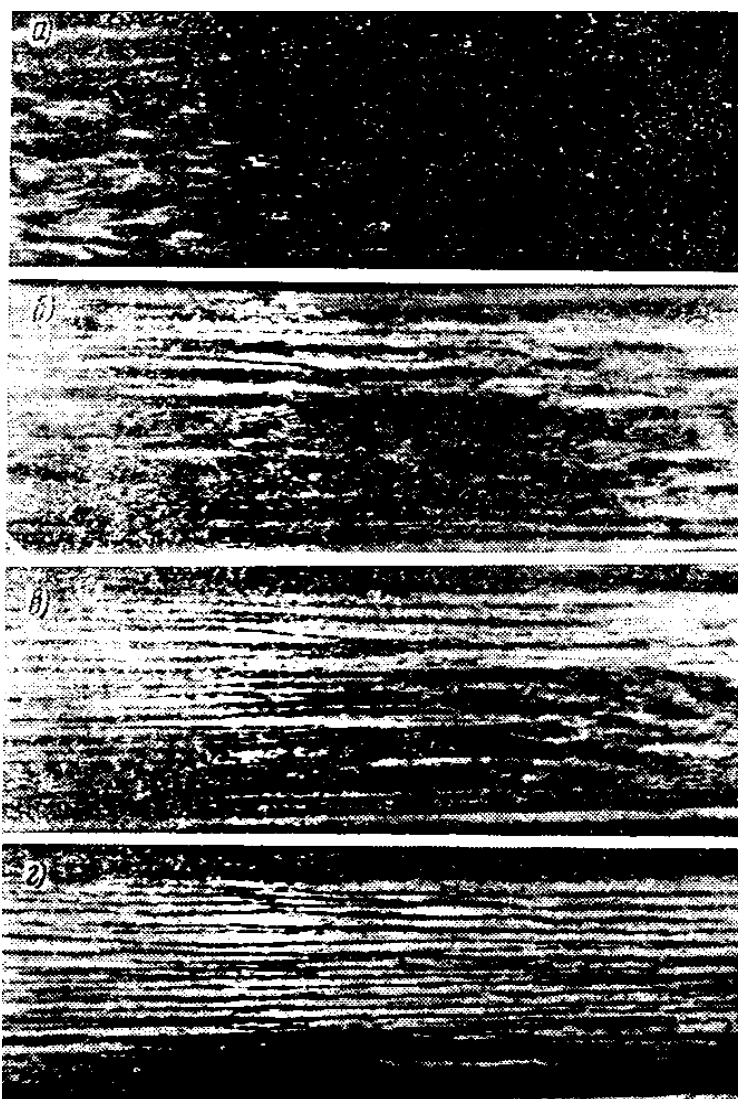
вают краску на дне и концентрируют её в месте контакта с соседними телами вращения.

Направление вращения водных струй не определялось, однако очевидно, что имеем дело со смешанным типом, когда сходящиеся и расходящиеся течения чередуются между собой.

Выдвинута гипотеза вихревых шнуров. При турбулентном режиме движения воды и взвесенесущих потоков наблюдаются вихри жидкой фазы всех размеров. Возникновение и распространение вихрей хаотичное и непредсказуемое. Такие условия вполне приемлемы для дополнительной дезинтеграции глинистых веществ потока, промывки и отмытки твёрдых частиц от глинистой массы и обеспечения выделения из потоков золота крупных и средних размеров.

Для усиления этого эффекта производится подборка размеров трафаретов, конфигурации и размеров ячеек ковриков, резко увеличивающих шероховатость дна шлюзов глубокого и мелкого наполнения, усиления коэффициента трения потока о покрытие и подложки дна шлюзов. Процесс выделения и извлече-

ния мелкого и тонкого золота требует более спокойных потоков даже при больших скоростях движения. При этом необходимо перевести вихревую структуру потоков от условий хаотического возникновения и распределения разноразмерных вихрей в режим управляемого создания вихревых шнуров требуемого размера,двигающихся организованно, компактно, направленно, слоистыми пачками при достаточно большой скорости перемещения. Иначе, структура вихревого потока должна соответствовать схеме псевдоламинарного слоистого движения вихревых шнуров. Внутренние вихревые шнуры и наружные должны быть по возможности одинакового диаметра, структуры внутренних элементов потока и наружных (пристеночных и свободной поверхности) не должны сильно отличаться. Вредным эффектом может быть образование «косых» внутренних и наружных волн. Если в опытах А.И. Лосиевского схема внутренних течений не зависела от чисел Рейнольдса и Фруда (число Фруда было в пределах 0,0007-0,24), то в данном случае (рис.1 и 2) она зависит от последнего критерия.



**Рис. 1.** Кинетика появления следов краски на дне прямолинейного желоба от движения водного потока, характеризующегося числом Фруда, равным 23: а – после 35 с; б – после 45 с; в – после 60 с; г – после 105 с

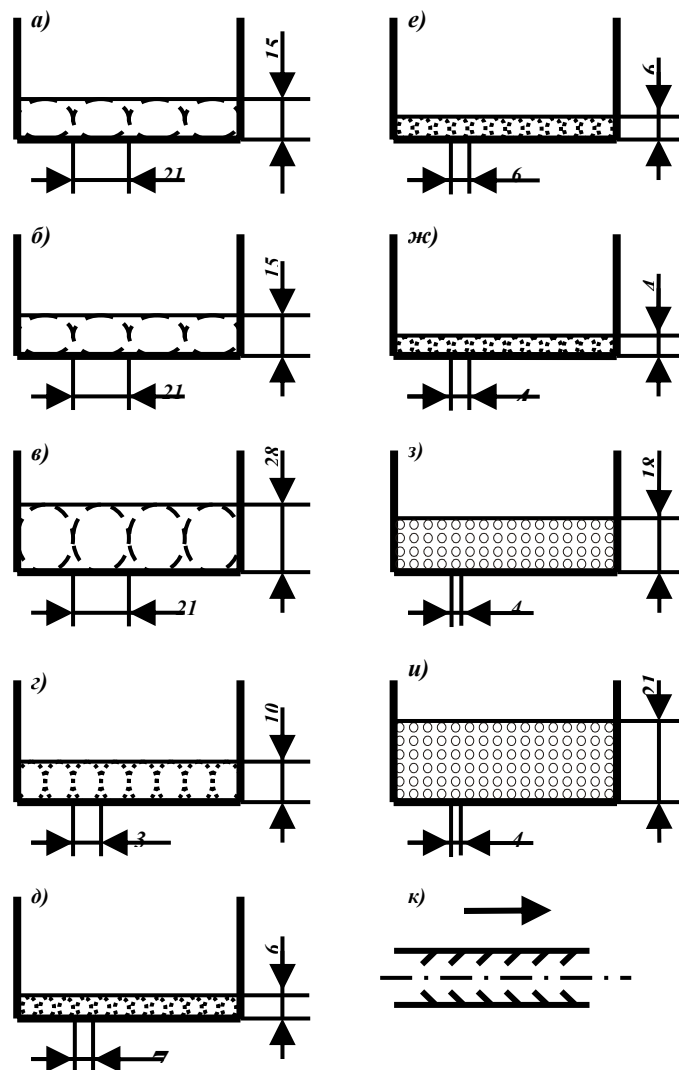


Рис. 2. Вихревое движение в потоке прямолинейного желоба при числах Фруда от 0,21 до 26

Установлено, что с увеличением числа Фруда от 0,24 до 26 и «бурности» потока уменьшается поперечное сечение тел вращения (диаметр) с 21 до 4 мм. В связи с этим вполне логично внутренние течения, имеющие размеры одного порядка с глубиной потока, назвать крупномасштабными вихрями.

Внутренние течения при числе Фруда более единицы будут тогда мелкомасштабными вихрями или вихревыми шнурами. При переходе потока из «спокойного» состояния в «бурное» наблюдаем переход крупномасштабных вихрей в мелкомасштабные, при этом крупные «дробятся» на более мелкие.

Зависимость между диаметром вихревых шнуров и числом Фруда может быть выражена в виде нового эмпирического уравнения:

$$D = c \frac{1}{\sqrt[3]{Fr}},$$

где  $D$  – диаметр вихревого шнура в направлении ширины желоба;  $c$  – коэффициент близкий по величине к единице;  $Fr$  – число Фруда.

Это уравнение позволяет выполнять расчёт и выбор размера диаметра вихревых шнуров, необходимого для извлечения требуемой крупности зёрен зо-

лота, находить техническое решение для выполнения вышеуказанного, что является новым в гидромеханике.

Размер поперечного сечения вихревых шнуров наиболее сильно изменяется при числе Фруда, равном единице, т.е. при критическом состоянии потока, при его переходе от «спокойного» режима к «бурному». Следует также отметить, что при числах Фруда более 3 диаметр вихревых шнуров становится минимальным и равным 4 мм.

При числах Фруда от 0,0007 до 11,0 размеры вихревых шнуров имеют определенные глубины потока (рис.2), поэтому можно считать, что они движутся в один слой и количество этих слоёв можно регулировать. При числах Фруда в пределах 11-23 диаметры вихревых шнуров становятся меньше глубины водного потока, поток превращается в регулируемую пачку слоисто движущихся вихревых шнуров, иначе – в псевдоламинарный режим движения.

В данном случае не определялось наличие вихревых шнуров в толще водного потока, но существование их доказано другими исследованиями. Поэтому, видимо, сталкиваемся с многослойным движением вихревых шнуров в потоке прямолинейного желоба.

Полученные результаты дополняют вышеназванные исследования по изучению внутренних течений: определен общий закон проявления внутренних течений, заключающийся в том, что размеры поперечного сечения их обратно пропорциональны числу Фруда или динамике водного потока. Тот факт, что при числе Фруда более единицы размеры внутренних течений резко уменьшаются до минимального значения, говорит о связи внутренних течений с волнами при переходе от «спокойного» к «бурному» состоянию потока.

Настоящее исследование также показывает, что внутренние течения суть не что иное, как вихревые шнуры, движение которых определяется стабильными характеристиками. Так, например, при данных параметрах водного потока на всей длине желоба остаются постоянными поперечные размеры вихревых шнуров, место движения их и направление - строго параллельное желобу. Также даны условия однослойно-

го, двухслойного движения водного потока. Такое же наблюдалось в криволинейных шлюзах (винтовых сепараторах и шлюзах).

Выдвинутая гипотеза вихрей и вихревых шнуров позволяет более осознанно подойти к разработке и совершенствованию конструкции гидравлического оборудования и методов регулировки вихревыми процессами.

Результаты исследований могут быть использованы в гидрологии, гидротранспорте и гравитационном способе обогащения полезных ископаемых, когда разделение минеральных зерен по плотности осуществляется в водных потоках. Вполне возможно, что зависимость между размерами тел вращения и числом Фруда может быть применена к внутренним волнам в океанах и морях, а также к процессам движения воздушных масс в атмосфере.

#### Библиографический список

1. Развитие теории и методов очистки природных и сточных вод: монография / К.Л.Ястребов [и др.]. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 259 с.
2. Совершенствование теории и практики подготовки и очистки природных и сточных вод / К.Л.Ястребов [и др.]. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 302 с.

3. Мельников В.В. Разработка и совершенствование эффективной технологии промывки и обогащения металлоносных песков: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009.

УДК 669.782+669.017

## МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАФИНИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Н.В.Немчинова<sup>1</sup>, Е.А.Гусева<sup>2</sup>, М.В.Константинова<sup>3</sup>

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Проведены макроскопический и микроскопический анализы образцов рафинированного технического кремния, полученного в руднотермической печи на ЗАО «Кремний» (г. Шелехов). Исследования проводились на травленных и нетравленных образцах, в светлом и темном поле. Установлено присутствие в кремнии различных по природе, сложных по составу металлических и неметаллических фаз. Проведенные исследования позволяют разработать способ дальнейшей очистки рафинированного технического кремния.

Ил. 5. Библиогр. 8 назв.

**Ключевые слова:** микрошлиф; макрошлиф; неметаллические включения; интерметаллиды; стеклофаза.

## METALLOGRAPHIC EXAMINATION OF REFINED INDUSTRIAL SILICON

N.V.Nemchinova, E.A.Guseva, M.V.Konstantinova

National Research Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074.

The authors carried out a macroscopic and microscopic analysis of samples of refined industrial silicon, obtained in an ore-thermal furnace at JSC «Silicon» (Shelekhov). The studies were performed on etched and not etched samples, in the

<sup>1</sup>Немчинова Нина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, тел.: (3952) 405116, 89027673811, e-mail: ninavn@istu.edu

Nemchinova Nina Vladimirovna, Candidate of technical sciences, associate professor of the chair of Metallurgy of Nonferrous metals, Deputy Dean of the Faculty of Chemical Engineering and Metallurgy for Research, tel.: (3952) 405116, 89027673811, e-mail: ninavn@istu.edu

<sup>2</sup>Гусева Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, тел.: (3952) 405147, 89500616247, e-mail: el.guseva@rambler.ru

Guseva Elena Alexandrovna, Candidate of technical sciences, associate professor of the chair of Engineering Technologies and Materials, tel.: (3952) 405147, 89500616247, e-mail: el.guseva@rambler.ru

<sup>3</sup>Константинова Марина Витальевна, кандидат химических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, тел.: (3952) 405147, 89500537195, e-mail: traderwood@irmail.ru

Konstantinova Marina Vitalievna, Candidate of Chemistry, associate professor of the chair of Engineering Technologies and Materials, tel.: (3952) 405147, 89500537195, e-mail: traderwood@irmail.ru