

УДК 629.563.424

**И. В. Качанов**, доктор технических наук, профессор,  
**К. В. Хвiticsко, И. М. Шаталов, М. К. Щербакoва, А. В. Максимович, И. В. Калиновский**  
Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65,  
220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 292 76 77, kris.hvitko@gmail.com

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВОРОТНОГО УЧАСТКА ПУЛЬПОПРОВОДА ЗЕМЛЕСОСНОГО СНАРЯДА

В статье представлены результаты компьютерного моделирования и предварительных гидравлических исследований поворотного участка нагнетательной трубы землесосного снаряда с различной формой поперечного сечения и выбрана оптимальная овальная форма поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы. Компьютерное моделирование было проведено в прикладном программном пакете Solid Works, а моделирование течения несжимаемой вязкой жидкости в поворотных участках нагнетательной трубы — на базе математического пакета Cosmos Fleo Works. Лабораторные исследования проводились на изготовленных из органического стекла моделях различных форм поперечного сечения (круглой, прямоугольной, овальной). После проведения исследований установлено, что использование на поворотных участках нагнетательной трубы землесосного снаряда оптимальной овальной формы поперечного сечения дает возможность снизить гидравлические сопротивления на 15...20 % и увеличить производительность землесосного снаряда в целом на 10...15 %.

**Ключевые слова:** землесосный снаряд; поворотный участок; овальная форма; износ; снижение гидравлических сопротивлений; повышение производительности.

Рис. 8. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

**I. V. Kachanov**, DSc in Technical Sciences, Professor,  
**K. V. Khvitsko, I. M. Shatalov, M. K. Scharbakova, A. V. Maksimovitsch, I. V. Kalinovsky**  
Belarusian National Technical University, 65 Independence Ave., 220013 Minsk,  
the Republic of Belarus, +375 (17) 292 76 77, kris.hvitko@gmail.com

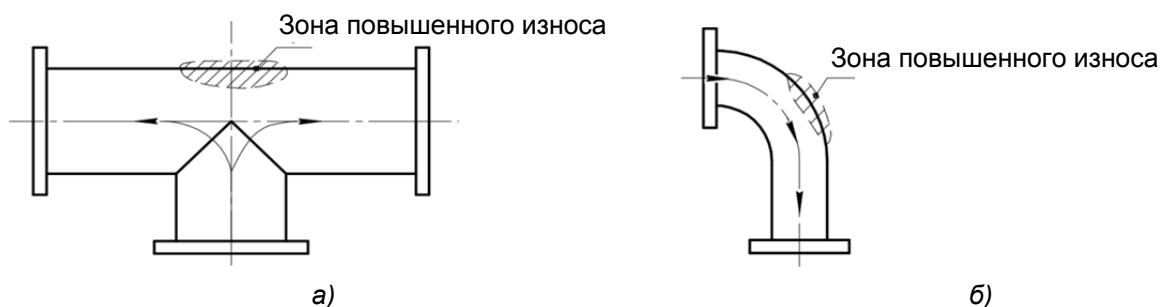
## COMPUTER MODELING AND LABORATORY HYDRAULIC INVESTIGATIONS OF THE DRIGGER SLURRY PIPE TURNING SECTION

The article presents the results of computer modeling and preliminary hydraulic studies of the injection pipe rotary section of a suction dredger with different cross-sectional shapes and the optimal, oval cross-sectional shape of the injection pipe rotary section is selected. Computer simulation has been carried out in the Solid Works application software package, and the flow simulation of an incompressible viscous fluid in the rotary sections of the injection pipe has been carried out on the basis of the Cosmos Fleo Works mathematical package. Laboratory studies on models made of Plexiglas of various cross-sectional shapes (round, rectangular, oval) have been carried out. After conducting the research, it has been found that using the optimal, oval cross-sectional shape on the turning sections of the dredger suction pipe, it is possible to reduce hydraulic resistance by 15...20 % and increase the productivity of the dredger as a whole by 10...15 %.

**Key words:** dredge; turning area; oval shape; wear; hydraulic resistance reduction; productivity increase.

Fig. 8. Table 1. Ref.: 7 titles.

**Введение.** На водотоках и водоемах Республики Беларусь землесосные снаряды (далее — земснаряды) осуществляют дноочистительные и дноуглубительные работы, а также добычу строительного песчаного грунта различного гранулометрического состава. В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется около 30 земснарядов, которые постоянно сталкиваются с проблемой низкой производительности и энергоэффективности из-за износа и существенного увеличения гидравлического сопротивления нагнетательной трубы грунтового насоса земснаряда, особенно его фасонных элементов: переходников, тройников и поворотных участков нагнетательной трубы (рисунок 1) [1].



**Рисунок 1. — Поворотный участок пульпопровода:  
а — тройник; б — плавный поворот**

Анализ научно-технической литературы и патентно-информационных источников показывает, что снижение гидравлических сопротивлений трубопроводных систем различного назначения и особенно их фасонных элементов является весьма актуальной задачей [2—7]. Наибольший интерес в этом плане вызывают поворотные участки труб, снижение гидравлических сопротивлений которых позволяет снизить общие потери напора в трубопроводных системах в среднем на 15...20 %. На величину гидравлических сопротивлений поворотных участков, кроме общеизвестных геометрических параметров (диаметра трубы  $d$ , радиуса  $R$  и угла  $\alpha$  поворота), существенное влияние оказывает форма поперечного сечения трубы поворотного участка [4], так как стандартная круглая форма поперечного сечения не является оптимальной с гидравлической точки зрения. Подбор оптимальной формы поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы грунтового насоса земснаряда в перспективе позволит оптимизировать процесс совместной работы грунтового насоса и нагнетательной линии и определить рабочую точку с максимальной производительностью и минимальными энергозатратами при эксплуатации земснаряда.

На кафедре гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики Белорусского национального технического университета (далее — ГЭСВТГ БНТУ) было разработано инновационное отечественное устройство для улучшения гидродинамики перекачиваемой жидкости на поворотных участках трубопроводов путем использования на этих участках поперечного сечения овальной формы (рисунок 2) [7].

На основании указанного устройства [7] и предварительных экспериментальных данных, полученных в лаборатории кафедры ГЭСВТГ БНТУ, была установлена перспективность использования на поворотных участках поперечных сечений овальной формы для снижения потерь напора при движении перекачиваемой жидкости [2; 3].



**Рисунок 2. — 3D-модель предложенной (овальной) формы поперечного сечения поворотного участка: а — схема поперечного сечения колена овальной формы; б — компьютерная 3D-модель колена овальной формы**

Использование поперечного сечения трубы овальной формы на поворотных участках может существенно (примерно в 1,5 раза) снизить гидравлическое сопротивление поворотного участка (колена) и уменьшить потери напора (механической энергии) при перекачке любой жидкости (в том числе пульпы в нагнетательной трубе грунтового насоса земснаряда), что в свою очередь приведет к увеличению производительности и энергоэффективности работы земснаряда в целом на 20...30 %, а также попутно снизит износ поворотных участков.

Целью работы является компьютерное моделирование и лабораторные исследования гидродинамики поворотного участка нагнетательной трубы землесосного снаряда и экспериментальное определение его основных гидродинамических характеристик (средней скорости  $v$ , расхода  $Q$ , потерь напора  $h_{стр}$ ).

**Материалы и методы исследования.** Для проверки теоретических предположений о гидродинамике перекачиваемой жидкости на поворотных участках нагнетательной трубы земснаряда на кафедре ГЭСВТГ БНТУ было проведено компьютерное моделирование и предварительные экспериментальные исследования в гидравлической лаборатории поворотных участков (колена с углом поворота на  $90^\circ$ ) нагнетательной трубы с различными формами поперечных сечений: круглой, прямоугольной и овальной.

При проведении компьютерного моделирования учитывалось, что наиболее эффективной формой поперечного сечения любого гидравлического канала с гидродинамической точки зрения (максимальная пропускная способность при минимальном гидравлическом сопротивлении) является криволинейная форма: параболическая или полукруглая — для открытых каналов, эллиптическая или овальная — для каналов замкнутого профиля. Это связано с тем, что у каналов криволинейной формы поперечного сечения имеет место минимальное значение смоченного периметра  $\chi$  и максимальное значение гидравлического радиуса  $R$  при эквивалентных (равных) площадях живого сечения  $S$ , а также отсутствуют угловые сконцентрированные вторичные вихревые течения. Поэтому для проведения сравнительного анализа и выбора оптимальной формы поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы были выбраны три самые технологичные (с точки зрения их изготовления) формы: круглая, прямоугольная, овальная.

Компьютерное моделирование поворотных участков нагнетательной трубы земснаряда различной формы поперечного сечения и разработка их твердотельной модели проводились в прикладном программном пакете Solid Works, а моделирование течения несжимаемой вязкой жидкости в поворотных участках нагнетательной трубы осуществлялось на базе математического пакета Cosmos Fleo Works.

Для проведения компьютерного моделирования течения рабочей жидкости внутри проточной части с различной формой поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы была создана обобщенная имитационная математическая модель течения несжимаемой вязкой жидкости на основе уравнений Навье—Стокса [2; 3]:

$$\vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p = \frac{d\vec{u}}{dt} - \nu \nabla^2 \vec{u},$$

где  $\vec{F}$  — вектор массовых сил, отнесенных к единице массы жидкости;  
 $\rho$  — плотность жидкости;  
 $\text{grad}p$  — градиент давления;  
 $\frac{d\vec{u}}{dt}$  — вектор ускорения инерционных сил в заданной точке объема жидкости;  
 $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости;  
 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  — оператор Лапласа;  
 $\vec{u}$  — вектор местной скорости.

Совместно с уравнением Навье—Стокса использовалось уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0.$$

Для проверки сделанных выше предположений в гидравлической лаборатории кафедры ГЭСВТГ БНТУ были проведены предварительные лабораторные исследования трех моделей поворотных участков (рисунок 3), выполненных из оргстекла с круглой, прямоугольной и овальной формой поперечного сечения моделей. На рисунке 4 представлен фрагмент лабораторных исследований трубы круглого поперечного сечения.

Предварительные исследования проводились с использованием в качестве рабочей жидкости водопроводной воды, которая подавалась в лабораторные модели поворотных участков из напорного резервуара при постоянном гидростатическом напоре  $H = 2$  м водного столба, угол установки отводящей трубы модели поворотного участка был равен  $30^\circ$ .

В процессе проведения предварительных исследований для оценки производительности моделей измерялся объемный расход  $Q$  л / с, а для оценки величины гидравлического сопротивления моделей измерялась дальность отлета струи  $h_{\text{стр}}$ .

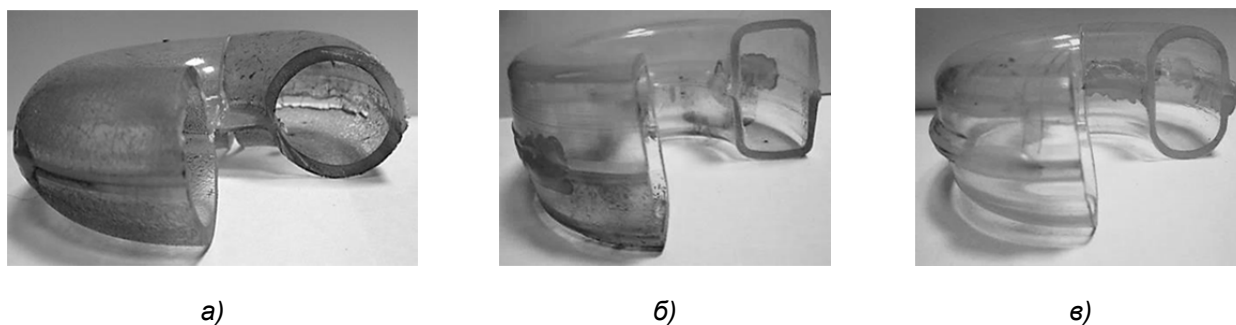
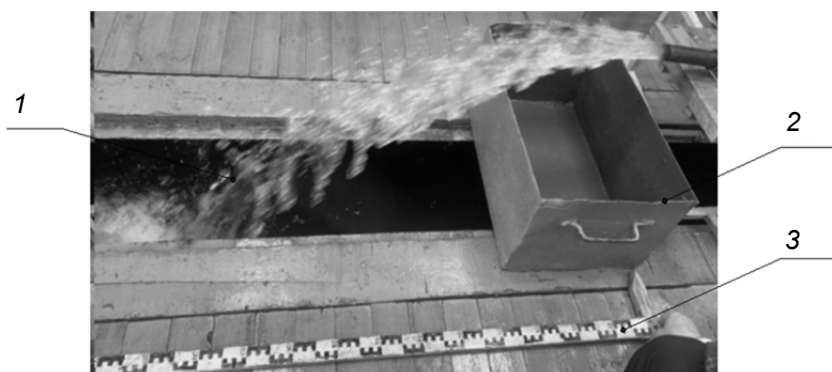


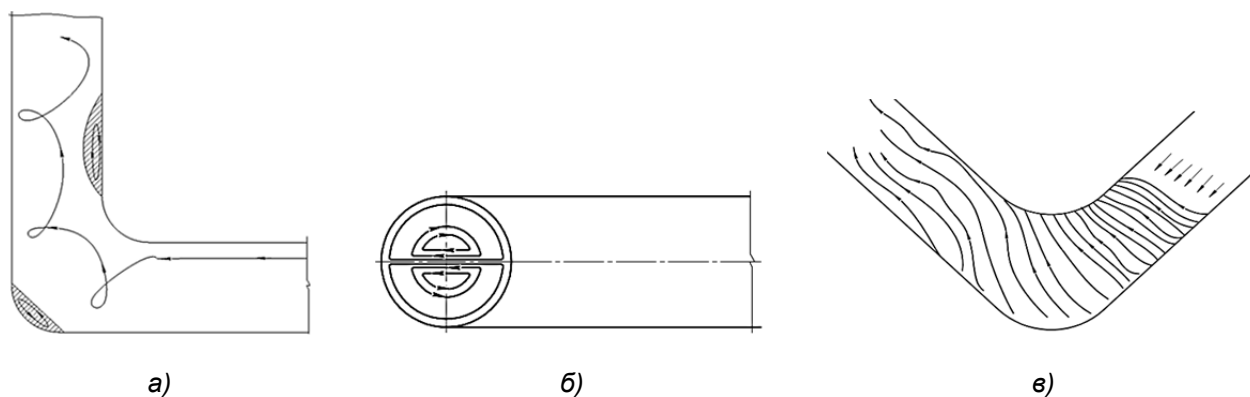
Рисунок 3. — Лабораторные модели поворотных участков трубы различных форм поперечного сечения: а — круглая; б — прямоугольная; в — овальная



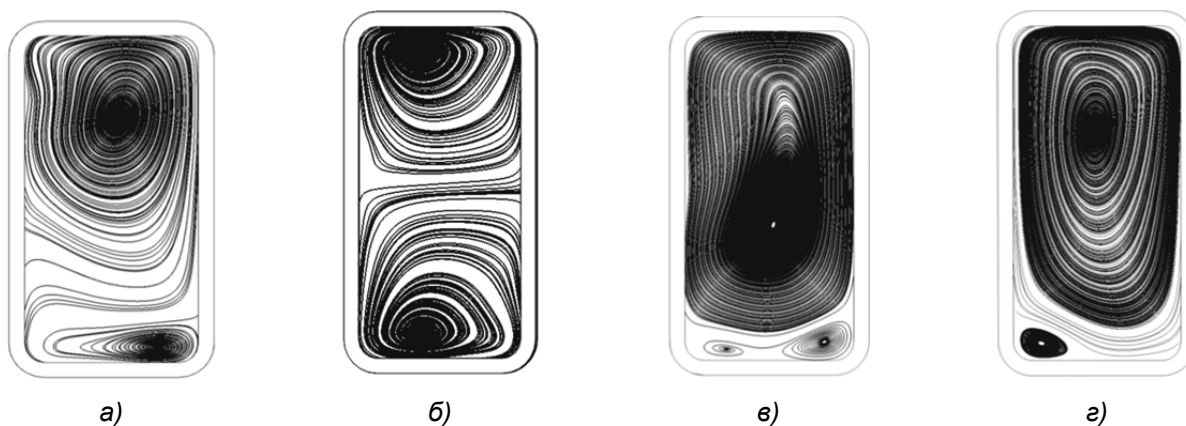
1 — струя; 2 — бак; 3 — мерная линейка

Рисунок 4. — Лабораторные исследования поворотного участка трубы круглого поперечного сечения

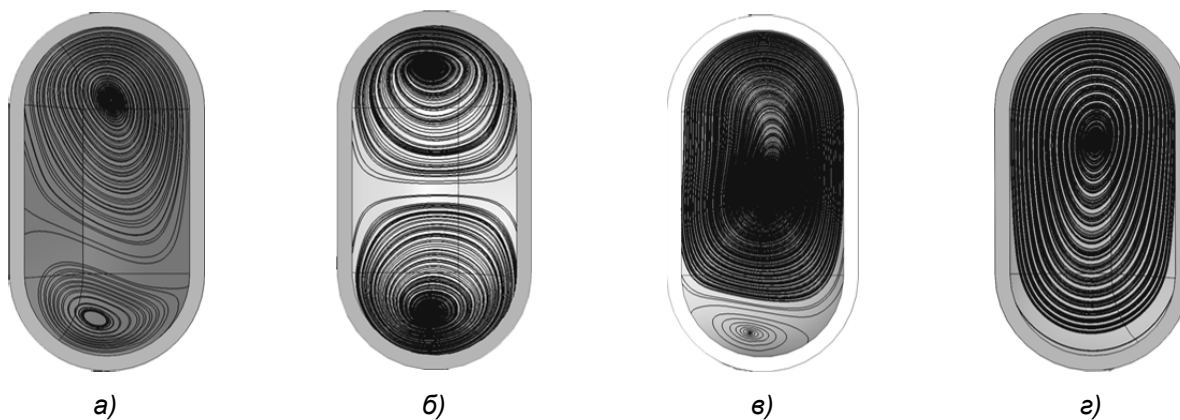
**Результаты исследования и их обсуждение.** Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 5, 6, 7.



**Рисунок 5.** — Схема формирования «парного вихря» в круглом поперечном сечении трубы земснаряда: *а* — образование продольного вихревого течения на поворотном участке круглого поперечного сечения; *б* — «парный вихрь» в колене круглого поперечного сечения; *в* — абсолютные линии тока в колене круглого поперечного сечения



**Рисунок 6.** — Схема формирования «парного вихря» в прямоугольном поперечном сечении трубы земснаряда: *а* — на входе в колена; *б* — в наивысшей точке; *в* — на выходе из колена; *г* — в отводящей трубе



**Рисунок 7.** — Схема формирования «парного вихря» в овальном поперечном сечении трубы земснаряда: *а* — на входе в колена; *б* — в наивысшей точке; *в* — на выходе из колена; *г* — в отводящей трубе

Компьютерное моделирование показало, что на поворотном участке трубы (колени с углом поворота  $90^\circ$ ) скорость движения жидкости изменяет свое направление, что сопровождается искривлением линий тока (поворот потока) и появлением центробежных сил, приводящих к тому, что по направлению от центра кривизны давление увеличивается, а скорость, соответственно, падает, и наоборот, по направлению к центру кривизны скорость возрастает, а давление падает. Поэтому в колени при переходе жидкости из прямолинейного участка в изогнутый скорость вблизи внутренней стенки повышается, а давление, соответственно, уменьшается, т. е. возникает конфузторный эффект. Вблизи внешней стенки колена происходит обратное явление: скорость падает, а давление растет, т. е. возникает диффузорный эффект. Переход жидкости из изогнутой части в прямолинейный участок (после поворота потока) сопровождается противоположными явлениями: диффузорным эффектом вблизи внутренней стенки и конфузторным эффектом вблизи внешней стенки. Диффузорные явления приводят к соответствующему отрыву потока от обеих стенок. При этом отрыв от внутренней стенки усиливается стремлением потока по инерции двигаться прямолинейно, в данном случае — по направлению к внешней стенке (см. рисунок 5).

Вихревая зона, возникающая вследствие отрыва потока от внешней стенки, незначительна: она заполняет только внешний угол поворота, не стесняя заметно сечения основного потока. Наоборот, отрыв от внутренней стенки приводит к интенсивному вихреобразованию, зона которого распространяется далеко за изгибом трубы (см. рисунок 5).

Помимо вихревых областей у внутренней и внешней стенок, в изогнутой трубе возникает ещё «парный вихрь», появление которого обуславливается наличием пограничного слоя и, соответственно, ядра потока с максимальными скоростями. Ядро, стремясь в изогнутой трубе двигаться по инерции в направлении к внешней стенке, расположенной дальше от центра кривизны трубы, в силу неразрывности движения заставляет более медленные слои жидкости в пограничном слое двигаться вблизи обеих боковых стенок в сторону внутренней стенки поворота, расположенной ближе к центру кривизны трубы, в результате чего в поперечном сечении трубы возникают два вихря (см. рисунки 5, 6, 7).

Вторичные токи, создаваемые «парным вихрем», накладываются на главный поток, параллельный оси трубы, и в результате придают линиям тока винтообразную форму, которая распространяется на прямой участок за изгибом и исчезает весьма медленно на большой длине. Практически закручивание потока заканчивается на длине 10...15 калибров.

«Парный вихрь» в потоке воды на поворотном участке нагнетательной трубы земснаряда формируется постепенно. На входе в колени он имеет несимметричную форму, как и на выходе из него (см. рисунки 6, 7). Это связано с неравномерным распределением центробежных сил на вогнутой поверхности колена. На входе в колени действие центробежных сил увеличивается, достигая максимального значения в наивысшей точке. В связи с этим на входе в колени «парный вихрь» имеет форму сплюснутых несимметричных поверхностей, причем площадь вихря у внешней (вогнутой) стенки значительно больше площади вихря у внутренней (выпуклой) стенки колена. При перемещении потока воды к наивысшей точке колена «парный вихрь» приобретает симметричную форму с одинаковыми площадями вихрей.

Далее при переходе потока воды от наивысшей точки к выходу из колена действие центробежных сил постепенно затухает, а «парный вихрь» вновь приобретает несимметричную форму, но в этом случае площадь вихря у внешней стенки увеличивается, а площадь вихря у внутренней (выпуклой) стенки уменьшается (см. рисунки 6, 7). В отводящей трубе (т. е. за колени) «парный вихрь» полностью исчезает, и на участке трубы 10...15 калибров сохраняется только общее винтовое течение, которое постепенно затухает, и поток приобретает нормальную структуру (рисунок 8).

В колени круглого поперечного сечения «парный вихрь», как показало компьютерное моделирование, имеет форму двух сплюснутых круговых поверхностей с большой площадью поверхности контакта (см. рисунок 5, б), что может привести к увеличению гидравлического сопротивления колена в целом. К тому же такой «парный вихрь» имеет значительный по величине момент инерции, который также оказывает существенное влияние на величину потерь механической энергии на поворотном участке нагнетательной трубы земснаряда [6].

В колене прямоугольного поперечного сечения с соотношением сторон меньшей к большей 1:2 (большая сторона направлена по нормали к оси кривизны колена) и в колене круглого сечения происходит постепенное формирование «парного вихря» от входа к наивысшей точке и выходу (см. рисунок 6).

Но в этом случае две части «парного вихря» вытягиваются вдоль большей оси прямоугольного сечения, площадь поверхности их контакта значительно уменьшается (в 1,2...1,3 раза), что может привести к снижению гидравлического сопротивления. Однако компьютерное моделирование показало, что прямоугольная форма поперечного сечения не является оптимальной, так как у «парного вихря» сохраняется плоскость контакта вихрей, а в углах прямоугольного сечения появляются локальные вихревые течения. К тому же сохраняется довольно большое значение момента инерции «парного вихря» [6].

Анализ результатов компьютерного моделирования колен с круглым и прямоугольным поперечным сечением показал, что минимальным моментом инерции обладает круговое сечение вихря [6], к тому же круговое сечение имеет не плоскость, а линию контакта вихрей, что, в свою очередь, может привести к снижению гидравлического сопротивления колена в целом.

Обобщая вышеизложенное, можно прийти к выводу, что основной формой поперечного сечения может быть выбрана овальная форма с соотношением меньшей оси к большей 1:2 (как у прямоугольной), причем большая ось овала направлена по нормали к оси кривизны колена.

Компьютерное моделирование такого колена показало, что соотношение малой и большой осей 1:2 не является оптимальным, так как «парный вихрь» сохраняет ярко выраженную сплюсненную форму (см. рисунок 7). Это явление можно полностью или почти полностью устранить, увеличив соотношение осей овала до 1:3 или 1:4, сохраняя направление большей оси по нормали к оси кривизны колена. Следует отметить, что у овальной формы поперечного сечения отсутствуют угловые локальные вихревые течения, что является преимуществом по сравнению с прямоугольным сечением.

К тому же применение овальных сечений с соотношением малой к большой осей 1:3 или 1:4 позволит придать «парному вихрю» круговую форму с минимальным моментом инерции и линией (а не плоскостью) контакта «парного вихря», согласно нашему предположению, что дает возможность снизить гидравлическое сопротивление от 1,5 до 2 раз.

Сравнительный анализ результатов проведенного компьютерного моделирования показал, что наиболее оптимальной формой поперечного сечения поворотного участка (колена) нагнетательной трубы земснаряда с углом поворота 90° является овальная форма с соотношением малой и большой осей 1:3 или 1:4, причем большая ось кривизны должна быть направлена по нормали вдоль оси кривизны колена.

Основные результаты проведенных предварительных лабораторных гидравлических исследований приведены в таблице 1.



Рисунок 8. — Схема исчезновения «парного вихря» на выходе из колена

Т а б л и ц а 1. — Результаты лабораторных испытаний

Форма поперечного сечения	Расход, л / с	Средняя скорость, м / с	Дальность полета, м
Круглая	2,71	0,1570	1,05
Прямоугольная	2,88	0,1675	1,22
Овальная	3,00	0,1740	1,32

Анализ приведенных в таблице 1 результатов гидравлических исследований показывает, что изменение формы поперечного сечения колена от круглого до прямоугольного и затем овального приводит к увеличению расхода  $Q$  в среднем на 10 %, скорости  $v$  — на 10 % и дальности полета струи (т. е. уменьшению гидравлического сопротивления) — на 25 %.

Проведенное компьютерное моделирование и предварительные лабораторные гидравлические исследования позволили сделать следующие выводы:

– стандартная круглая форма поперечного сечения колена напорной трубы земснаряда не является оптимальной с точки зрения минимизации гидравлического сопротивления (потерь напора);

– наиболее оптимальными сечениями с точки зрения минимизации гидравлического сопротивления (потерь напора) является прямоугольное и овальное сечения;

– по производительности прямоугольное сечение превосходит круглое на 5...10 %, а по снижению гидравлического сопротивления — на 10...15 %;

– использование овального сечения позволяет увеличить производительность на 10...15 % по сравнению с круглым и снизить гидравлическое сопротивление на 15...25 %.

Также был установлен характер изменения контактной поверхности «парного вихря» для различных форм поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы земснаряда (см. рисунки 5, 6, 7) и влияние формы поперечного сечения поворотного участка нагнетательной трубы земснаряда на его основные гидравлические характеристики (дальность отлета струи  $h_{стр}$ , расход жидкости  $Q$ , средняя скорость  $v$  (см. таблицу 1) .

**Заключение.** Проведенное компьютерное моделирование и предварительные лабораторные гидравлические исследования моделей поворотных участков (колен) нагнетательной трубы грунтового насоса земснаряда показали, что наиболее оптимальной формой поперечного сечения колена является овальная, что позволяет увеличить производительность земснаряда минимум на 10...15 %; уменьшить гидравлическое сопротивление на 15...20 % с последующим возможным снижением износа поворотного участка нагнетательной трубы земснаряда. Представленные в статье результаты компьютерного моделирования и лабораторных гидравлических исследований подлежат дальнейшему детальному исследованию и уточнению.

#### Список цитированных источников

1. Шкундин, Б. М. Землесосные снаряды : учеб. пособие / Б. М. Шкундин. — 2-е изд., перераб. — М. : Энергия, 1973. — 272 с.
2. Математическая модель движения огнетушащей жидкости в проточном тракте лафетного ствола с винтовой структуризацией потока / И. В. Качанов [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2013. — № 2. — С. 156—164.
3. Теоретические и компьютерные исследования дальнобойного пожарного лафетного ствола при ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах промышленного и гражданского назначения / И. В. Качанов [и др.] // Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке : сб. докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 17 марта 2017 г. : в 3 т. / Тюмен. гос. ун-т ; редкол.: А. Б. Храмов (отв. ред.) [и др.]. — Тюмень, 2017. — Т. 1. — С. 59—64.
4. Идельчик, И. Е. Гидравлические сопротивления / И. Е. Идельчик. — М. ; Л. : Гос. изд-во, 1954.
5. Некрасов, Б. Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Б. Б. Некрасов, Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев. — Минск : Выш. шк., 1985. — 368 с.
6. Некрасов, Б. Б. Гидравлика и ее применение в летательных аппаратах / Б. Б. Некрасов. — М. : Машиностроение, 1967. — 368 с.
7. Пожарный монитор [Электронный ресурс] : пат. 21238 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) А62С31/02 / И. В. Качанов [и др.] ; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. — № а 20140385 ; заявл. 28.02.16 ; опубл.: 31.10.2017 / Нац. центр интеллект. собственности. — Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/data/59065/1/21238.pdf> . — Дата доступа: 10.03.2023.

Поступила в редакцию 06.04.2023.