

УДК 004.94: 622.32

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИННОМ САМООЧИЩАЮЩЕМСЯ ФИЛЬТРЕ

Третьяк Александр Александрович<sup>1</sup>,  
130504t@mail.ru

Кузнецова Алла Витальевна<sup>1</sup>,  
alvitkuz@yandex.ru

Швец Виталий Викторович<sup>1</sup>,  
motorsila@yandex.ru

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова,  
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью создания оптимальных фильтров, конструкция и физические принципы которых обеспечивают замедление процессов коагуляции, снижение гидравлического сопротивления и длительный период эксплуатации.

**Цель:** разработать самоочищающийся фильтр оптимальной, с точки зрения гидродинамики, конструкции.

**Объект:** скважинный самоочищающийся фильтр, требующий улучшения гидродинамических характеристик течения жидкости за счет изменения конструкции перфорационных отверстий.

**Методы:** компьютерное моделирование гидродинамической задачи течения жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с использованием прикладного программного продукта SolidWorks.

**Результаты.** Описана предложенная авторами конструкция частицеудерживающего скважинного самоочищающегося фильтра, оснащенная системой вращающихся постоянных магнитов. Магнитное поле, создаваемое при вращении постоянных магнитов, обеспечивает существенное снижение процессов коагуляции. Дальнейшее совершенствование конструкции связано с понижением гидравлического сопротивления, препятствующего проникновению откачиваемой жидкости в полость фильтра. Приведена методика создания имитационной модели для решения внутренней гидродинамической задачи течения жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с использованием прикладного программного пакета SolidWorks. Моделирование предназначено для имитации прохождения текучей среды (воды) через цилиндрические отверстия в стенке фильтра в направлении снаружи внутрь. Исследованы гидродинамические эффекты и основные физические параметры, имеющие место в результате прохождения жидкости через цилиндрические перфорационные отверстия. Выполненное моделирование течения откачиваемой жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре позволило установить оптимальную конструкцию сверления перфорационных отверстий в каркасе фильтра и оптимальную длину фильтра, равную 0,4 мощности пласта.

### Ключевые слова:

Самоочищающийся скважинный фильтр, гидродинамический анализ, гидродинамическое моделирование течения жидкости в скважинном фильтре, угол наклона перфорационных отверстий, программный пакет SolidWorks.

### Введение

В настоящее время разработано множество видов скважинных фильтров. Каждая конструкция имеет свои индивидуальные особенности, обладает рядом преимуществ и недостатков при эксплуатации в различных условиях, в которых будет работать фильтр. К наиболее важным условиям относятся: тип коллектора, его однородность и проницаемость, а также особенность фильтруемой жидкости (флюида). Кроме того, к дополнительным факторам, влияющим на конструктивные особенности фильтров, можно отнести: перепад давления, температуру, коррозионную среду, неустойчивость коллектора и т. д. Проектируемый фильтр должен обладать высокой пропускной способностью, задерживать частицы достаточно малого размера, быть несложным в эксплуатации, иметь большой ресурс работы и низкую себестоимость [1–3].

Через некоторый промежуток времени фильтры теряют свою пропускную способность,

т. е. коагулируются. Фильтры гидрогеологических скважин в большинстве своем коагулируются катионами солей жесткости кальциево-карбонатного класса, а фильтры нефтяных скважин – парафиносмолистыми веществами [4].

К традиционным способам улучшения качества фильтрующей жидкости (воды) относятся: 1) использование ионообменных смол, при котором ионы кальция и магния, растворенные в воде, замещаются ионами натрия, присутствующими в ионообменных смолах; 2) использование обратноосмотических мембранных установок, способных снизить содержание всех солей, растворенных в воде. Каждый из этих способов имеет свои недостатки, поэтому альтернативным способом борьбы с отложениями солей кальция и магния является магнитная обработка воды. Магнитная обработка инициирует выделение катионов солей жесткости в массу воды, а не на поверхности фильтра [5–8].

Требования, предъявляемые к фильтрам гидрогеологических скважин:

- 1) наличие необходимой механической прочности и устойчивости против химической, электрохимической коррозии и эрозионного воздействия воды;
- 2) максимальный пропуск воды при минимальных размерах каркаса фильтра;
- 3) обладание оптимальной скважностью, наличие минимальных гидравлических сопротивлений;
- 4) устойчивость к разрушению при механической, физической и химической очистке каркаса фильтра.

В зависимости от целевого назначения скважин все фильтры следует подразделить на три группы:

- а) фильтры водозаборных и водопонижительных скважин, рассчитанных на ограниченный срок эксплуатации (от нескольких дней до нескольких месяцев);
- б) фильтры разведочных и водопонижительных скважин, рассчитанных на неограниченный срок эксплуатации (10–15 лет и более);
- в) фильтры наблюдательных скважин, из которых водоотбор не производится.

Выбор типа фильтра определяется условиями его применения и, в первую очередь, характером

водосодержащих пород. На выбираемый тип и конструкцию скважин большое влияние оказывают: величина водоотбора, химический состав подземных вод, глубины скважины и т. п. [9, 10].

По конструктивному признаку фильтры можно разделить на две основные группы – с отверстиями, задерживающими частицы, и гравитационные. Каждая из этих групп, в свою очередь, имеет свои собственные классификации (рис. 1).

Частицы пород, проходящие через щели или отверстия частиц задерживающих фильтров, значительно сужают их эффективное сечение. Оседая на поверхности вблизи и внутри отверстий, отложения увеличивают гидравлическое сопротивление фильтра и способствуют ускорению химической закупорки. В гравитационных фильтрах эти явления проявляются в значительно меньшей степени. Однако именно первый класс фильтров получил наибольшее распространение. Фильтры с частицезадерживающими отверстиями конструктивно отличаются материалом, числом, размером и формой фильтрационных отверстий, конструкцией крепления фильтрующих элементов и т. д. В качестве труб используются обычно металлические обсадные трубы. Отверстия круглые или ще-



Рис. 1. Классификация фильтров буровых скважин

Fig. 1. Well-tube filters classification

левые. Размеры отверстий в каркасах подбирают из условия обеспечения максимальной скважности – не менее 25 % [11].

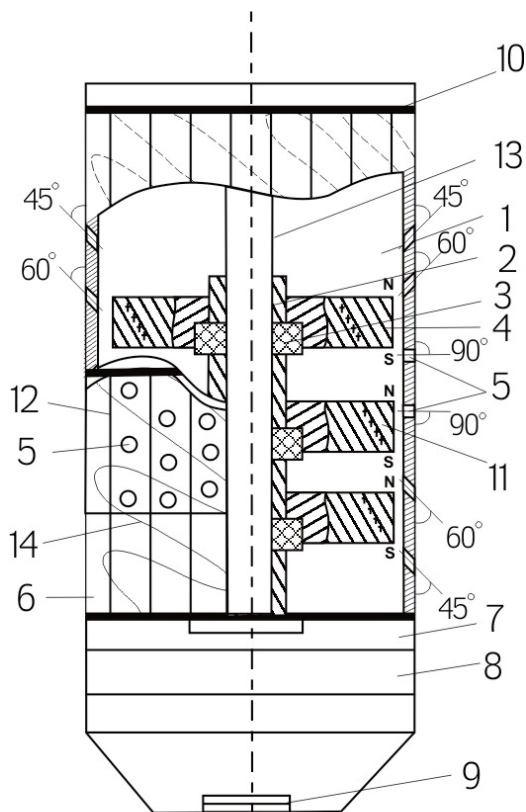


Рис. 2. Скважинный самоочищающийся фильтр: 1 – каркас; 2 – втулка; 3 – опора скольжения из материала типа «Маслянит»; 4 – кольцевые постоянные магниты; 5 – перфорационные отверстия каркаса; 6 – фильтровая рубашка в виде автономных секций; 7 – нижний соединительный элемент – переводник; 8 – отстойник; 9 – промывочный клапан; 10 – верхний соединительный элемент – левый переводник; 11 – наклонные ребра постоянных магнитов; 12 – прокладочные элементы в виде опорных стержней; 13 – несущий стержень; 14 – внутренний слой фильтровой рубашки

Fig. 2. Well-tube self-cleaning filter: 1 is the frame; 2 is the sleeve; 3 is the sliding bearing of the «Maslyanit» type material; 4 are the ring permanent magnets; 5 are the perforation holes of the frame; 6 is the filter shirt in the form of autonomous sections; 7 is the lower connecting element – sub; 8 is the sump; 9 is the flush valve; 10 is the top connecting element – left-right sub; 11 are the inclined edges of permanent magnets; 12 are the gasket elements in the form of support rods; 13 is the bearing rod; 14 is the inner layer of the filter jacket

Проектирование фильтра оптимальной конструкции, подходящей к конкретным геологическим условиям скважины, и обеспечивающего длительное время эксплуатации представляет собой сложную техническую задачу. Это, прежде всего, повышение качества фильтрации механических примесей, а также предотвращение закупорки фильтрующих элементов при исключении кольматации в процессе эксплуатации. Для решения этой задачи авторами предложен скважинный

самоочищающийся фильтр, где поставленная задача достигается за счет введения в конструкцию системы постоянных магнитов [12]. На рис. 2 представлен общий вид самоочищающегося фильтра. На рис. 3 показано формирование силы  $F$  восходящего потока жидкости. На рис. 4 показан крутящий момент, поворачивающий ребристый магнит.

Кольцевые постоянные магниты с наклонными ребрами насажены на распорную втулку и опору скольжения, размещенные на несущем стержне. Расстояние между кольцевыми постоянными магнитами пропорционально коэрцитивной силе и напряженности магнитного поля. Все элементы фильтра выполнены из немагнитных материалов: фильтровые трубы – из сплавов алюминия, бронзы, латуни, полиэтилена или пропилена; обмотки – из капронового или нейлонового шнура; внешний фильтрующий элемент – из синтетической тканевой сетки или капронового шнура. Оси симметрии перфорационных отверстий в каркасе фильтра образуют с осью вертикально установленного фильтра углы, изменяющиеся от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  в нижней части и зеркально от  $90^\circ$  до  $45^\circ$  верхней части фильтра. За счёт этого имеет место снижение гидростатического сопротивления потока жидкости.

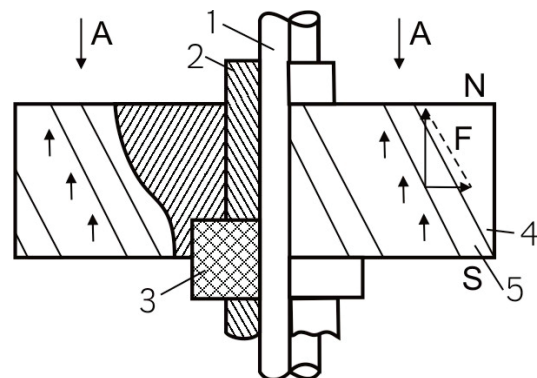


Рис. 3. Формирование силы  $F$  восходящего потока жидкости

Fig. 3. Upward flow force  $F$  development

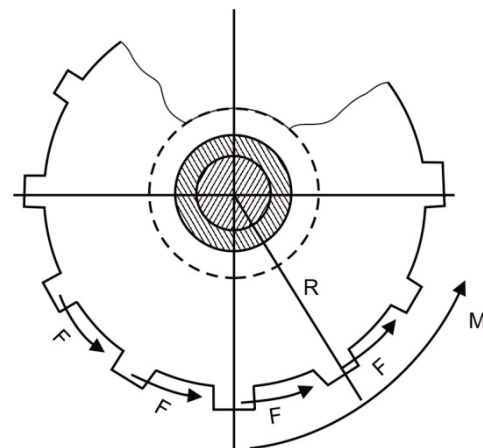


Рис. 4. Крутящий момент, поворачивающий ребристый магнит

Fig. 4. Torque turning rifled magnet

При работе насоса жидкость, проходя через перфорационные отверстия в каркасе фильтра, омагничивается вращающимися кольцевыми постоянными магнитами. При этом имеет место пересечение водой магнитных силовых линий. Магнитное поле поляризует молекулы катионов солей жесткости, содержащиеся в воде, расщепляет их на положительно заряженные ионы. Ионы образуют более пористое по сравнению с кальцитом соединение – арагонит, который легко разрушается и вымывается из внутреннего объема фильтра вместе с потоком жидкости.

Количество перемагничиваний воды соответствует числу магнитов, смонтированных внутри фильтра. Медленно вращающееся постоянное знакопеременное магнитное поле создает дополнительное воздействие на откачиваемую жидкость и усиливает её омагничивание, а значит, ещё сильнее препятствует отложению солей на отверстиях фильтра.

Однако у данной модели, как и у ее аналогов, существует конструктивный недостаток, связанный с недостаточно полным использованием мощности насоса ЭЦВ-6-10-80. Производительность системы «насос–фильтр» в процессе работы снижается до 10 % от расчетной. Это связано с необходимостью дополнительных энергетических затрат на преодоление сил сопротивления всасыванию жидкости через фильтр во внутреннюю полость фильтра через отверстия, расположенные по всей площади поверхности. Соответственно, величина потеря мощности насоса (или уменьшение объемов отфильтрованной жидкости) на преодоление сил сопротивления всасыванию определяет гидродинамическую эффективность фильтрующей системы в целом. То есть было установлено, что угол перфорационных отверстий влияет на производительность скважины в целом.

#### О методике гидродинамического моделирования

С целью проверки этой версии нами было выполнено компьютерное моделирование гидродинамической задачи течения жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с использованием прикладного программного продукта SolidWorks. Результаты этой работы представлены ниже. Из зависимости

$$Q = v \frac{\pi D^4}{4}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход, а  $v$  – средняя скорость течения потока в отверстии круглого сечения диаметром  $D$ , можно определить основные пути повышения гидродинамической эффективности скважинного фильтра и установить, что:

1) при увеличении диаметра на 10 % при скорости потока 0,01 м/с расход увеличивается на 18 %; предлагаемое решение затруднено ввиду технологических ограничений из-за снижения прочности конструкции и уменьшения общей надежности фильтра;

2) увеличение производительности фильтрующей системы за счёт увеличения скорости потока жидкости через отверстия, согласно (1), справедливо только для идеальной системы, в которой поток движется перпендикулярно плоскости отверстия и вдоль направления всасывания (рис. 5).

В реальных условиях гидродинамическая эффективность фильтра во многом определяется углом наклона оси всасывания жидкости  $\alpha$  и углом наклона оси отверстия  $\beta$  относительно направления потока всасывания жидкости (рис. 6). При этом отклонение угла  $\beta$  от угла  $\alpha$  будет изменять эффективный диаметр отверстия  $D_{\text{эфф}}$  относительно реального диаметра  $D_{\text{реал}}$ , как показано на рис. 7. Под эффективным диаметром здесь понимается условный, не имеющий реальных границ диаметр цилиндрического объема в области реального отверстия, в котором скорость движения частиц жидкости максимальна. При условии, что мощность насоса (или объём отфильтрованной жидкости) постоянна  $Q = \text{const}$ , отверстие будет идеальным с точки зрения гидродинамики в том случае, если эффективный диаметр отверстий будет стремиться к реальному ( $D_{\text{эфф}} \rightarrow D_{\text{реал}}$ ), что может быть достигнуто при максимальном уменьшении угла наклона отверстия относительно оси всасывания насоса. Тогда, как следует из зависимости (1), скорость движения потока жидкости через отверстие будет снижаться, этот показатель и будет критерием гидродинамической эффективности конструкции фильтра. Но, поскольку поток всасывания жидкости имеет вертикальное направление, наименьшие потери, связанные с преодолением сил сопротивления всасыванию потока через отверстия, могут быть получены за счёт изменения угла наклона оси отверстия  $\beta$ .

Проверка этого предположения может быть осуществлена на основе гидродинамического моделирования. Поскольку фильтр имеет значительное число отверстий, критерием эффективности может служить средняя скорость потока во всех отверстиях фильтра или, для уменьшения расчетного времени, средняя скорость во всех отверстиях одного ряда на всю глубину фильтра.

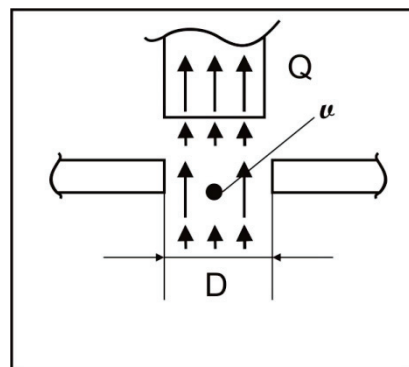


Рис. 5. Движение частиц идеального потока

Fig. 5. Ideal flux bits moving



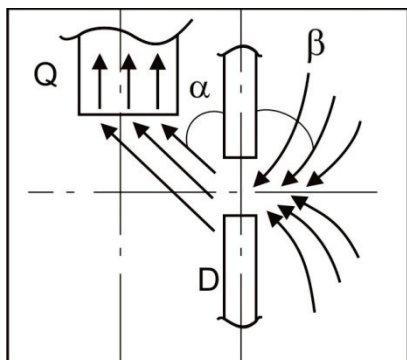


Рис. 6. Движение частиц реального потока

Fig. 6. Real flux bits moving

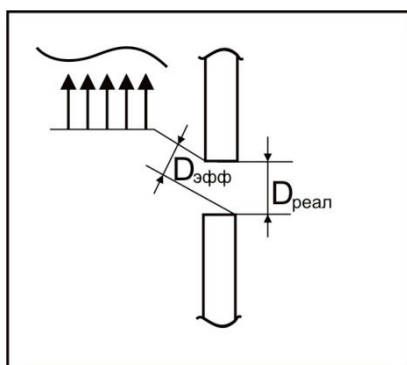


Рис. 7. Соотношение диаметров  $D_{эфф}$  и  $D_{реал}$

Fig. 7  $D_{eff}$  and  $D_{real}$  diameters ratio

Наиболее распространённой задачей, с которой сталкиваются при исследовании фильтрующих систем, является внутренняя гидродинамическая задача – исследование процесса всасывания жидкости, окружённой твёрдыми стенками, в трубах и цилиндрических аппаратах. Частным случаем внутренней гидродинамической задачи является задача изучения эффектов, возникающих при протекании жидкости через перфорационные поверхности твердотельных полых элементов [13–15].

Компьютерное моделирование фильтрующих систем посредством современных универсальных программных систем конечно-элементного анализа, к которым относятся ANSYS, SolidWorks, Nastran, Open FOAM и др., может быть выполнено с различной степенью детализации. В системах имеются богатые библиотеки, содержащие большое количество уже готовых стандартных деталей и конструкций, оборудование, соединительные элементы. Эти средства используют различные подходы к моделированию и обладают различным инструментарием – удобным или неудобным – при решении той или иной задачи. Большинство из указанных систем совместимы между собой на уровне проектирования моделей напрямую или путём использования нейтральных форматов (iges, parasolid). Возможен экспорт твердотельных моделей, созданных в других системах проектирования, например КОМПАС-3D, AutoCAD и т. д. Однако изменение и модификация таких экспортиро-

ванных объектов при длительном процессе, связанном с внесением изменений в конструкцию модели, может вызвать дополнительные сложности.

Основной проблемой при моделировании течения в фильтрах является радикальное различие масштабов: диаметры отверстий составляют миллиметры (15–20), при том, что габариты колонны измеряются метрами и число протяженных по периметру цилиндра отверстий составляет несколько сотен. То есть модель фильтра представляет собой структурно-неоднородную твёрдотельную среду, образованную периодическими объектами. Для фильтров подобной структуры рациональным является макро моделирование (моделирование на макроуровне) с учетом основных конструктивных особенностей, с постепенным введением в модель менее значимых элементов. Так, на начальных этапах моделирования можно пренебречь наличием металлической сетки, препятствующей попаданию мелких частиц в перфорационные отверстия, заменив её шероховатостью поверхности и/или наличием ещё достаточно высокого поверхностного сопротивления. С другой стороны, последующее микро моделирование (моделирование на микроуровне) с использованием одного отверстия или ряда отверстий в поперечном сечении позволит довести конструкцию отверстия до совершенства при незначительном росте ресурсов – времени и вычислительных мощностей.

В работе в качестве средства моделирования использовался встроенный модуль для моделирования течения жидкостей и газов Flow Simulation, входящий в состав системы прикладного моделирования SolidWorks. Flow Simulation позволяет выполнять расчёт потоков жидкости и газа внутри и снаружи твердотельных деталей и конструкций, реализованных в форме SolidWorks-модели [16–19]. Движение потоков жидкостей и газов описывается уравнением Навье–Стокса, которое интерпретирует законы сохранения массы, импульса и энергии для указанных веществ [20]. Дополнительно в уравнения включены элементы, описывающие состояние жидкости; элементы, описывающие геометрию потока, его граничные и начальные условия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0; \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} &= \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, i = 1, 2, 3; \\ \frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \\ + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H; \\ H &= h + \frac{u^2}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u$  – скорость жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $S_i$  – внешние массовые силы, действующие на единицу массы текущей среды:

$$S_i = S_i^{porous} + S_i^{gravity} + S_i^{rotation}; \quad (3)$$

$S_i^{porous}$  – сопротивление пористого тела;  $S_i^{gravity}$  – сила гравитации;  $S_i^{rotation}$  – центробежная сила;  $h$  – энталпия;  $Q_H$  – источник тепла или тепло в единице объёма;  $\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений;  $q_i$  – тепловой поток за счёт диффузии. Нижние индексы  $i, j$  отвечают проекциям на координатные ветви [13].

Использование Flow Simulation позволяет исследовать широкий диапазон гидродинамических явлений и процессов, возникающих внутри и снаружи скважинных фильтров, работающих в аномальных условиях.

Общий план решения гидродинамической задачи исследования потоков жидкости через скважинный фильтр с помощью Flow Simulation представляет собой итерационный процесс, включающий следующие этапы:

- 1) создание твердотельной модели фильтра в SolidWorks;
- 2) создание проекта для проведения гидродинамического моделирования;
- 3) выбор граничных условий моделирования;
- 4) выбор цели проекта;
- 5) запуск процесса моделирования и проведения расчёта целей;
- 6) просмотр и анализ результатов, определение точности полученного решения, сравнение с результатами предшествующего моделирования; внесение изменений в конструкцию фильтра, граничные условия и цели моделирования;
- 7) возврат к п. 2.

С целью проверки гипотезы, было проведено моделирование работы скважинного перфорационного фильтра с насосом и при следующих допущениях:

- 1) внешняя среда – скважина – представлена цилиндрическим сосудом произвольного диаметра, заполненным жидкостью – водой, в которую полностью погружено моделируемое устройство;
- 2) в конструкции фильтра учтена базовая конфигурация, существенно влияющая на гидродинамическую обстановку; сетка, покрывающая фильтр, отсутствует; вращение элементов конструкции отсутствует;
- 3) засорение отверстий отсутствует, т. е. форма отверстия идеальная, диаметр отверстий неизменный;
- 4) наличие примесей – частиц размерами менее 1 мкм – не учитывается;
- 5) величина шероховатости стенок фильтра и отверстий нулевая (0 мкм).

Определены граничные и начальные условия моделирования, используемые при решении уравнений (2, 3):

- 1) давление жидкости на стенки фильтра вдоль всей его длины является постоянной величиной на протяжении всего процесса моделирования;
  - 2) температура прокачиваемой жидкости при движении в полости фильтра не изменяется;
  - 3) явления теплопроводности, теплопередачи излучением между стенками фильтра и прокачиваемой жидкостью не учитываются;
  - 4) мощность насоса неизменна и составляет  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
  - 5) давление жидкости составляет  $101325 \text{ Па}$  ( $760 \text{ мм рт.ст.}$ );
  - 6) температура прокачиваемой жидкости составляет  $293,2 \text{ К}$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- Примечание. Указанные параметры давления и температуры соответствуют стандартным значениям для скважин, глубина которых не превышает  $100 \text{ м}$ .
- 7) шероховатость стенок фильтра и перфорационных отверстий – реальная стенка, сталь марки 3, оказывающая сопротивление трения потоку всасываемой жидкости.
  - 8) производительность насоса определяется его заданной мощностью и составляет  $0,0833 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

На первом этапе создана твердотельная оболочка, поверхность которой обтекает жидкость, проникая через отверстия и попадая внутрь (рис. 8). Создание твердотельной модели осуществлялось на основе операций, производимых над плоскостными эскизами, непосредственно в SolidWorks, поскольку это дало возможность производить необходимые изменения над твердотельной конструкцией модели на более поздних этапах моделирования в пределах самой программы. Конструкция фильтра представлена стальным цилиндрическим резервуаром длиной  $h_\phi = 10 \text{ м}$ , диаметром  $d_\phi = 168 \text{ мм}$ , толщиной стенки  $w_\phi = 8 \text{ мм}$ . Перфорационные отверстия диаметром  $d_{отв} = 20 \text{ мм}$  расположены в шахматном порядке на расстоянии  $l_{отв} = 70 \text{ мм}$  от центров по горизонтали и вертикали. Общая площадь фильтра  $S_\phi$ , контактирующего с внешней средой, составила:

$$S_\phi = 2\pi r_\phi h_\phi \approx 2 \cdot 3,14 \cdot (168/2) \cdot 10000 \approx 5275200 \text{ мм}^2 \approx 5,27 \text{ м}^2.$$

Число отверстий в одном ряду

$$n_{отв/ряд} = [2\pi r_\phi / l_{отв}] \approx 2 \cdot 3,14 \cdot (168/2) / 70 \approx 8 \text{ шт.}$$

Число рядов отверстий

$$n_{отв} = [n_{отв/ряд} \cdot l_{отв}] - 10000 / 70 \approx 142 \text{ шт.}$$

Полное число отверстий фильтра

$$n_{отв} = n_{отв/ряд} \cdot n_{ряд} = 142 \cdot 8 = 1136 \text{ шт.}$$

Общая площадь отверстий  $S_{отв}$ , контактирующих с внешней средой:

$$S_{отв} = 2\pi r_{отв} \cdot n_{отв} = 2 \cdot 3,14 \cdot (20/2)^2 \cdot 1136 \approx 713408 \text{ мм}^2 \approx 0,71 \text{ м}^2.$$

Соотношение площади отверстий к площади фильтра:

$$S_{отв} / S_\phi = 0,71 / 5,27 = 0,13 \text{ \%}.$$

Угол наклона отверстий составляет  $90^\circ$ .

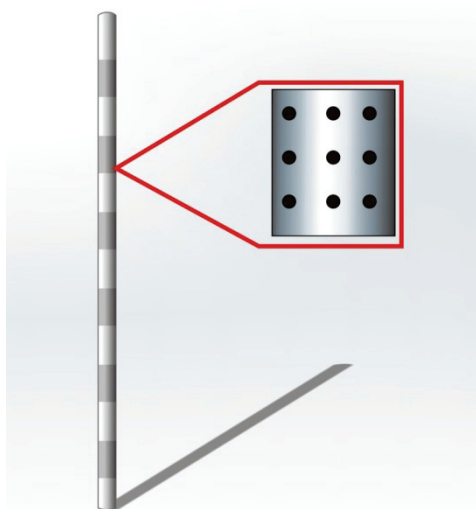


Рис. 8. Эскиз модели фильтра длиной 10 м

Fig. 8. 10 meters-long filter model's sketch

Создание проекта исследования

При создании проекта исследования модели фильтра использовались стандартные настройки:

- система единиц измерения – Си (SI);
- учёт гравитационного эффекта ( $g=9,8 \text{ м/с}^2$ );
- отключение закрытых полостей, не заполняемых жидкостью (исключение пустот);
- задача понимается как переходная (Time-dependent);
- жидкость, течение которой будет рассчитываться в проекте, – вода;
- размеры расчётной 3D-области:  $\pm 0,5 \text{ м}$  по координатам  $x$  и  $z$ ,  $+11 \text{ м}$  по координате  $y_{\text{верх}}$ ,  $0 \text{ м}$  по координате  $y_{\text{низ}}$ ;
- начальные параметры потока:  $V_x, V_y, V_z=0 \text{ м/с}$ ;
- термодинамические параметры потока: давление –  $101325 \text{ Па}$ , температура –  $293,2 \text{ К}$ ;
- течение ламинарное и турбулентное без учёта кавитации; характеристики турбулентности:  $I_t - 0,1 \%$ ,  $L_t - 0,00168 \text{ м}$ ;  $k - 1 \text{ Дж/кг}$ ,  $\varepsilon - 0,1 \text{ Вт/кг}$ ;

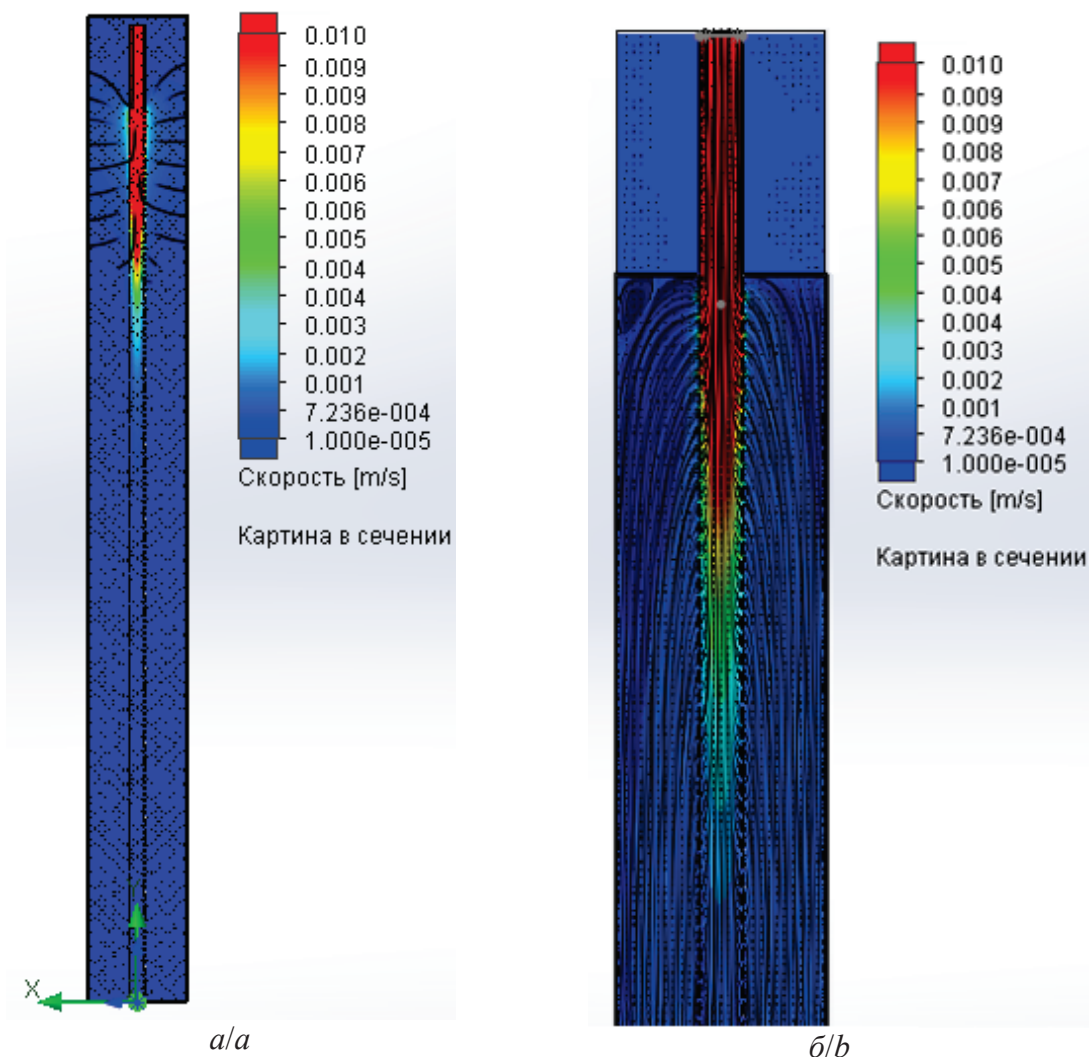


Рис. 9. Движение потока частиц в фильтре длиной 10 м: а) полная модель, б) верхняя часть активной части фильтра

Fig. 9. Particle flux moving in the 10-meter-long filter: a) full model, b) top of the filter active part



- поток жидкости одномерный, направленный вдоль оси  $z$ ;
- отсутствие кавитации.

Задание целей

На этапе задания целей указаны гидродинамические параметры, определение которых является основной задачей моделирования. Эти параметры являются критериями сходимости решения гидродинамической задачи и определяют завершение расчёта проекта. В качестве целей назначены минимальная, средняя и максимальная скорость и давление по всей длине фильтра, характер траектории движения частиц жидкости.

Результаты моделирования

В результате моделирования были исследованы:

- 1) траектории движения частиц жидкости через отверстия цилиндрической стенки вдоль всей его длины;
- 2) изменения скорости и давления жидкости внутри фильтра вдоль всей его длины.

Распределение скоростей и траекторий движения частиц жидкости снаружи и внутри фильтра представлено на рис. 9.

Активная часть десятиметрового фильтра, всасывающая жидкость, не превышает 50 % его длины и составляет около 4 м (рис. 9, а). Движение жидкости внутри и вдоль активной части фильтра представлено на рис. 9, б. Характер потока ламинарный. Нижняя и средняя части фильтра заполнены жидкостью при его первоначальном опускании в скважину. Скорость движения потока частиц жидкости во внутренней зоне фильтра в его верхней части составляет 10 мм/с. На глубине более 4 м скорость потока падает до 0,1 мм/с. Ниже 4 м всасывания жидкости не происходит из-за ограниченной мощности насоса и чрезмерно длинной конструкции фильтра. В целом скорости течения низкие, поэтому поток движения жидкости ламинарный.

Последующее моделирование с целью уменьшения расчетного времени проводилось только для верхней активной зоны, составляющей 4 м. При этом площадь фильтра составляет 2,11 м<sup>2</sup>. Число рядов перфорационных отверстий  $n_{\text{ряд}}$  новой конструкции фильтра равно 55, общее число отверстий – 440. Общая площадь отверстий,  $S_{\text{отв}}$ , контактирующих с внешней средой, равна 0,28 м<sup>2</sup>. Соотношение площади отверстий к площади фильтра:

$$S_{\text{отв}}/S_{\text{ф}} \approx 0,24/2,11 \approx 0,11 \%$$

Характер движения частиц, распределение скоростей потоков и давлений внутри фильтра длиной 4 м представлены на рис. 10. Видно, что новая модель имеет лучшие гидродинамические характеристики: наибольшее всасывание происходит по-прежнему в верхней части фильтра, но длина рабочей зоны увеличилась.

Последующее увеличение длины рабочей зоны и потока всасывания можно получить на основе изменения угла наклона перфорационных отвер-

стий. С этой целью была проведена серия экспериментов с видоизменёнными моделями. Изменения касались формы отверстий. При просверливании отверстия под углом увеличивается площадь элементарной поверхности всасывания, поскольку форма отверстия изменяется с окружности на овал. Само отверстие, ориентированное в направлении потока всасывания, способствует наилучшему протеканию жидкости.

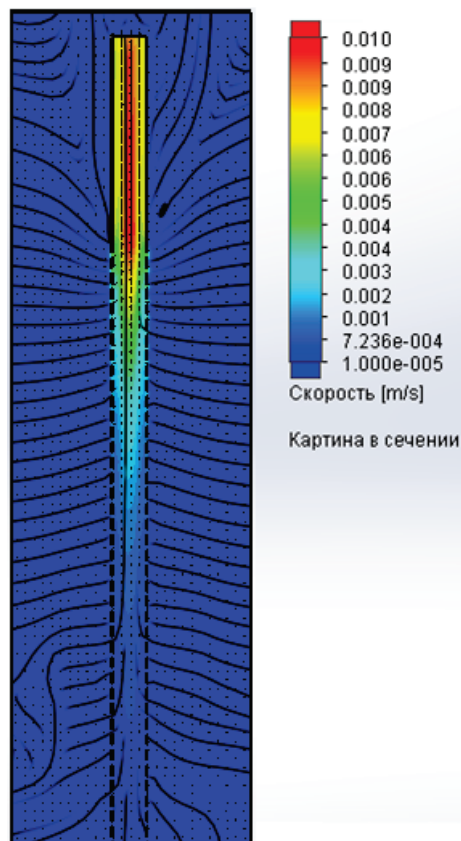


Рис. 10. Распределение скоростей в активной части фильтра длиной 4 м

Fig. 10. Speed distribution in the active part of the 4-meter-long filter

На основе базовой модели фильтра эффективной длины 4 м, отверстия которой расположены под углом 90°, были созданы следующие конструктивные модификации. Первую группу составляют модели, общее число рядов отверстий которых пропорционально делится на три равных части. Группы отверстий верхней и нижней части фильтра имеют определенные углы наклона относительно вертикальной оси фильтра, отличные от 90°: {30°, 40°, 60°, 150° (-30°), 140° (-40°), 120° (-60°)}. Центральная группа отверстий перпендикулярна оси, т. е. отверстия просверлены под углом 90°. Вторая группа моделей имеет один и тот же угол наклона отверстий вдоль всей длины фильтра {30°, 40°, 60°}. Отдельная модификация фильтра представлена семью группами отверстий, просверленных под углами {30°, 40°, 60°, 90°, 120°, 140°, 150°}. На рис. 11 отображены потоки и скорости всасывания отдельных модифицированных моделей.



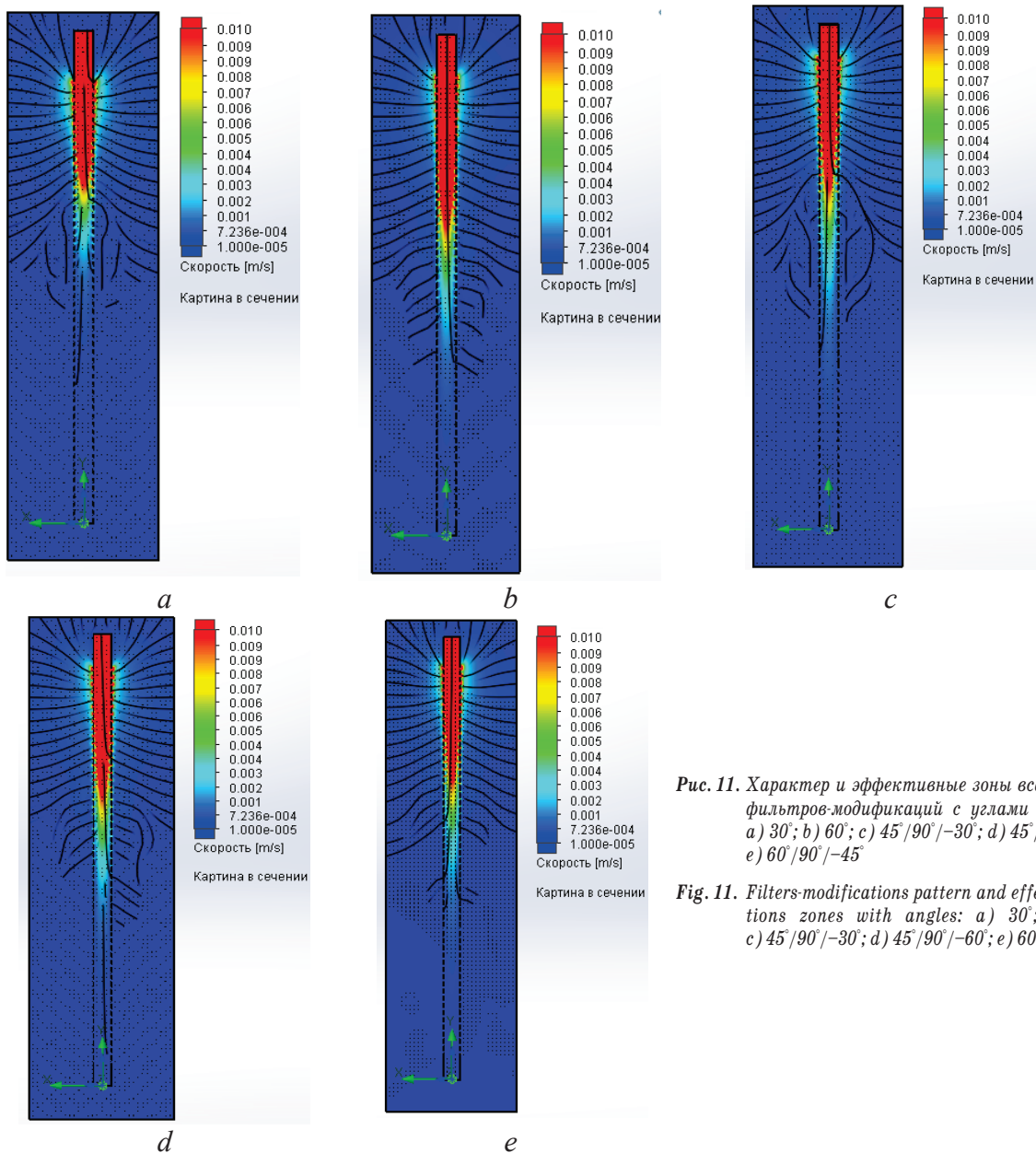


Рис. 11. Характер и эффективные зоны всасывания фильтров-модификаций с углами наклона: а) 30°; б) 60°; в) 45°/90°/-30°; д) 45°/90°/-60°; е) 60°/90°/-45°

Fig. 11. Filters-modifications pattern and effective suction zones with angles: а) 30°; б) 60°; в) 45°/90°/-30°; д) 45°/90°/-60°; е) 60°/90°/-45°

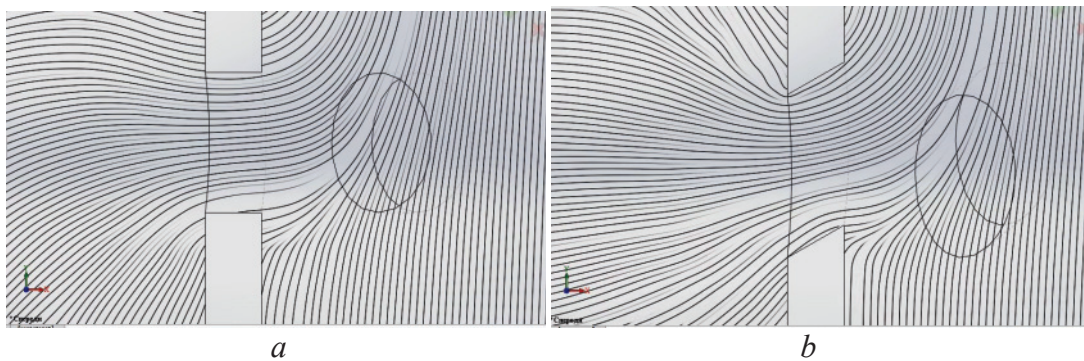


Рис. 12. Движение жидкости через отверстия с разными углами наклона: а) 90°; б) 40°

Fig. 12. Fluid moving through the holes with different angles of slope: а) 90°; б) 40°

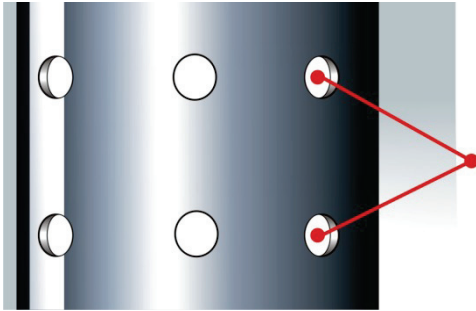


Рис. 13. Выбор локальных точек моделирования

Fig. 13. Choice of modeling points

Анализ модифицированных моделей показал, что наилучшими из них являются модели с однонаправленными перфорационными отверстиями – модели с углами 30, 40 и 60 градусов по ходу потока всасывания. На рис. 12 (а, б) показаны траектории потоков частиц жидкости через отверстия с разными углами наклона. Наилучшее движение частиц и высокие скорости наблюдаются через отверстия, ориентированные в направлении потока всасывания. Наибольший интерес для исследования представляют скорости движения потоков водных частиц в перфорационных отверстиях. С этой целью в проект моделирования добавлены точки, соответствующие геометрическим центрам отверстий с внутренней поверхности стенки фильтра вдоль всей его длины (рис. 13). В качестве целей моделирования заданы средние значения скоростей и давлений в указанных точках. Граничные

условия моделирования оставлены прежними. Значения средних скоростей потока для каждой модификации представлены в таблице, гистограмма распределения скоростей различных модификаций фильтра эффективной длины представлена на рис. 14. Эпюры скоростей с траекториями движения частиц жидкости при некоторых углах наклона отверстий представлены на рис. 15, а–е.

Таблица. Средние скорости потока жидкости в центрах отверстий

Table. Average flow rates at the holes centers

Модификации модели по величине углов наклона отверстий Model modifications according to the angle of the holes	Средняя скорость потока жидкости в центрах отверстий, м/с Average flow rate at the centers of the holes, m/s
90 (базовая модель) (base model)	0,010819
30/90/-40	0,015025
60/90/-40	0,015009
40/90/-30	0,015006
40/90/-40	0,014963
60/90/-30	0,014096
60/90/-60	0,011889
40/90/-60	0,011303
30/90/-60	0,010993
60	0,010700
40	0,010478
30	0,010218
30/40/60/90/-60/-40/-30	0,014451

Анализ результатов второго этапа моделирования показал, что для фильтра длиной 4 м и насоса мощностью 10 м<sup>3</sup>/ч:

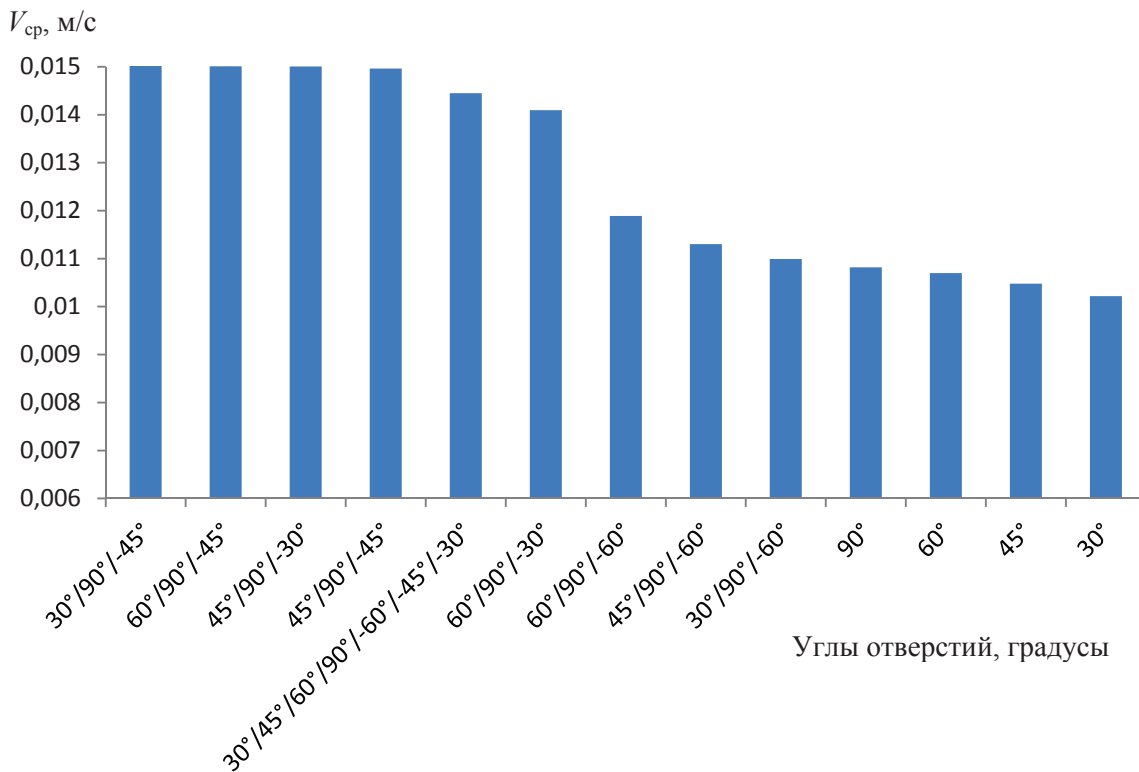


Рис. 14. Гистограмма распределения средних скоростей потока жидкости в центрах отверстий моделей фильтра

Fig. 14. Histogram of distribution of fluid flow average velocity in holes centres of filter models

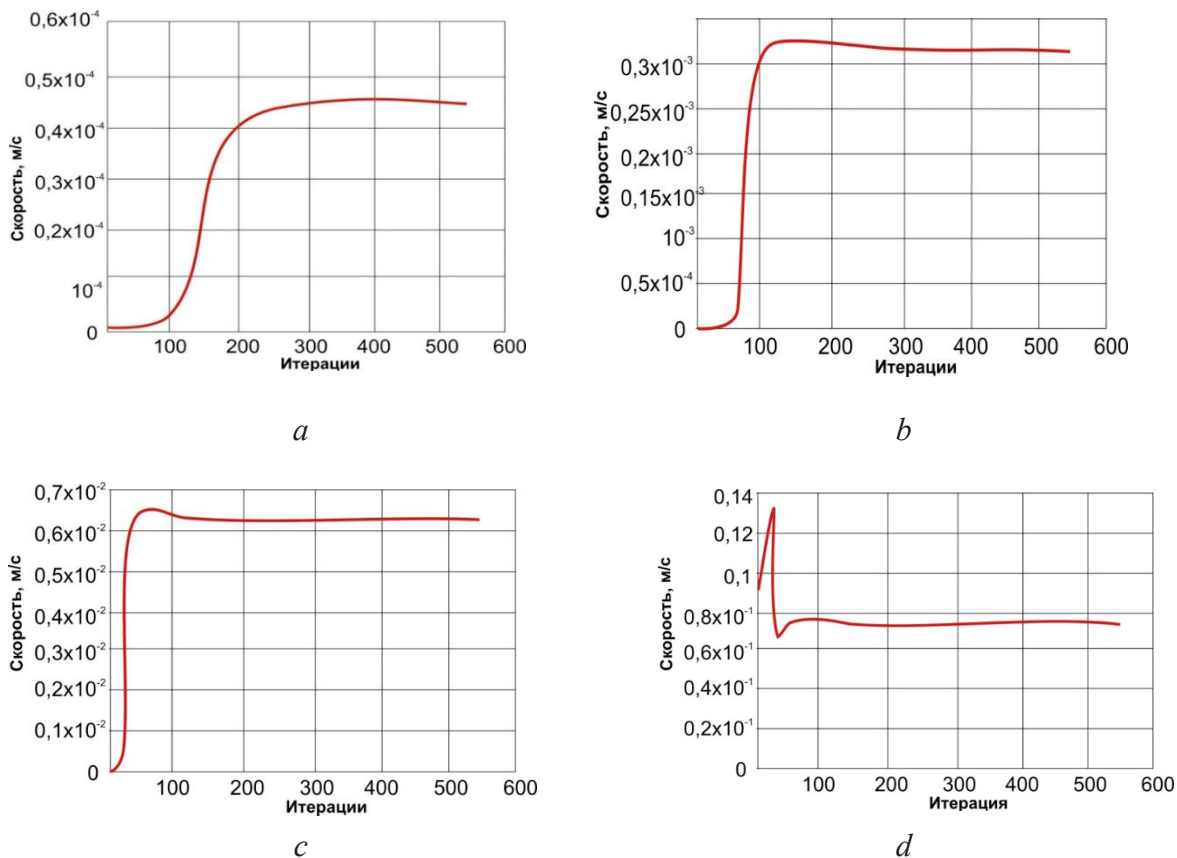


Рис. 15. Эпюры скоростей движения частиц в центрах отверстий с номерами: а) 55; б) 35; в) 20; д) 1

Fig. 15. Plots of particle velocities in hole centers with numbers: a) 55; b) 35; c) 20; d) 1

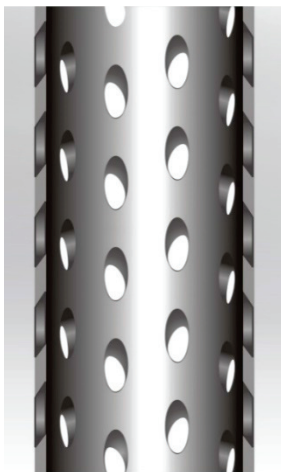


Рис. 16. Фрагмент фильтра с оптимальным углом наклона перфорационного отверстия

Fig. 16. Fragment of the filter with the optimal-canted punched holes

- 1) отверстия под углом  $90^\circ$  неэффективны;
- 2) угол наклона отверстий в нижней части модели (ниже 2 м) не влияет на эффективность всасывания;
- 3) предположение о максимальной эффективности конструкции  $\{30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 140^\circ, 150^\circ\}$  с точки зрения гидродинамики не оправдалось;

4) наиболее эффективными оказались модели с одинаковыми углами наклона отверстий  $\beta$ , максимально близкими по величине к углу  $\alpha$  (рис. 16).

После проведенного моделирования была изменена конструкция предложенного фильтра. Новая конструкция (рис. 17) имеет длину 0,5 мощности пласта и, следовательно, 0,5 первоначальной длины фильтра. Угол наклона перфорационных отверстий меняется равномерно от  $30^\circ$  в верхней части фильтра до  $40^\circ$  в его нижней части [21].

#### Заключение

1. Полученные в результате расчёта данные не противоречат теоретическим представлениям о поведении жидкостей при их движении в ограниченных пространствах и при наличии перфорационных отверстий, в частности.
2. Создание вращающегося магнитного поля, пронизывающего откачиваемую жидкость, обеспечивает существенное снижение процессов коагуляции за счет образования легко разрушаемых полиморфных модификаций карбоната кальция, вымывающихся из полости фильтра вместе с потоком жидкости. Последующее совершенствование предложенной конструкции фильтра связано со снижением гидравлического сопротивления, обусловленного деформацией потока всасываемой жидкости в отверстиях фильтра.

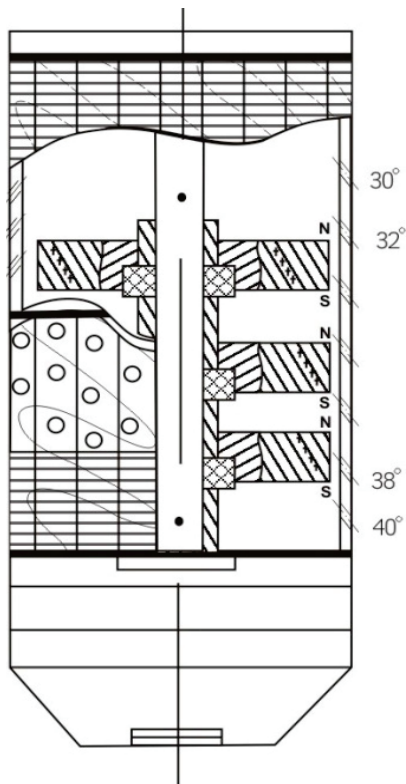


Рис. 17. Новая конструкция скважинного самоочищающегося фильтра

Fig. 17. New structure of the well-tube self-cleaning filter

3. Проведенный анализ различных конструкций фильтра методом компьютерного гидродинамического моделирования позволил выявить наиболее эффективную, с точки зрения угла сверления перфорационных отверстий, модель скважинного фильтра, имеющую длину 4 м и угол наклона в диапазоне  $30^{\circ}$ – $40^{\circ}$ .
4. Углы наклона отверстий  $\alpha$  в рабочей области фильтра должны составлять не более  $30^{\circ}$  от оси фильтра, при этом большее уменьшение угла недопустимо ввиду технологических ограничений, а именно, из-за снижения прочности конструкции и уменьшения общей надежности.
5. С точки зрения гидродинамики, диаметр отверстий  $D_{\text{расч}}$  рекомендуется увеличить, если это позволяют технологические условия.
6. Отверстия по всей длине фильтра рекомендуется сверлить в шахматном порядке, что позволит более равномерно всасывать и перемещать поток жидкости, упорядочить внутреннее течение и перемещать жидкость ламинарными слоями.
7. Моделирование конструкции с оптимальным углом расположения перфорационных отверстий позволило оценить гидродинамические характеристики устройств с поверхностным типом фильтрации на стадии проектирования, что позволяет снизить долю затрат на проектирование окончательной конструкции фильтра в его общей стоимости.
8. Анализ результатов второго этапа моделирования показал, что для фильтра длиной 4 м и насоса производительностью  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ :
  - отверстия под углом  $90$  градусов неэффективны;
  - угол наклона отверстий в нижней части модели (ниже 4 м) не влияет на эффективность всасывания;
  - предположение о максимальной эффективности конструкции  $\{30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}, 140^{\circ}, 150^{\circ}\}$  с точки зрения гидродинамики не оправдалось;
  - наиболее эффективными оказались модели с одинаковыми углами наклона отверстий  $\beta$ , максимально близкими по величине к углу  $\alpha$ , то есть в интервале  $30$ – $40$  градусов.
9. В результате моделирования процесса течения жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с помощью средств программного комплекса SolidWorks нам удалось решить задачу оптимальной конструкции перфорационных отверстий каркаса фильтра, что позволило уменьшить длину фильтровой колонны до  $50\%$  при неизменном удельном дебите и получить существенный экономический эффект.
10. Выполненное моделирование течения откачиваемой жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с использованием пакета моделирования SolidWorks позволило:
  - установить оптимальные углы сверления перфорационных отверстий в каркасе фильтра ( $30^{\circ}$ – $40^{\circ}$ ) в направлении течения жидкости;
  - установить, что оптимальной является скважность фильтра, равная  $25\%$ ;
  - установить эффективную длину фильтра, которая составляет  $0,4$  мощности водоносного пласта от исходной длины фильтра ( $10$  м);
  - добиться существенной экономии длины фильтровой колонны;
  - добиться уменьшения стоимости гидрогеологической скважины в целом;
  - установить, что при средней мощности водоносного горизонта, равной  $10$  м, фильтр длиной  $4$  м следует устанавливать в нижней части водоносного пласта;
  - отверстия по всей длине фильтра рекомендуется сверлить в шахматном порядке, что позволит насосу равномерно всасывать и перемещать поток жидкости ламинарными слоями.
11. Выполненное моделирование течения откачиваемой жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с использованием программного пакета SolidWorks позволило установить оптимальные углы сверления перфорационных отверстий в каркасе фильтра, изменяющиеся от  $40$  градусов в нижней части фильтра и до  $30$  градусов в верхней части фильтра и оптимальную длину фильтра, равную  $0,4$  мощности пласта.



12. В настоящее время подана заявка на самоочищающийся фильтр данной конструкции.
13. Использование имитационных моделей для решения гидродинамической задачи течения жидкости в скважинном самоочищающемся фильтре с использованием программного пакета SolidWorks и ему подобных в настоящее вре-

мя востребовано производителями и требует дальнейшего совершенствования.

*Результаты исследования получены в рамках реализации проекта Erasmus+ 574061- EPP-1-2016-1-DE-ERPKA2-SVHE-JP «Модернизация геологического образования в российских и вьетнамских университетах» МИНЕРАЛ.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилко В.М., Алексеев В.С. Фильтры буровых скважин. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2017. – 367 с.
2. Tang J.S. Fine filter cleaner improves function // Filtration and Separation. – 2016. – V. 53. – № 5. – P. 42–44.
3. Третьяк А.Я. Теоретические вопросы омагничивания полимерной промывочной жидкости // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 1994. – № 3. – С. 46–53.
4. Федоров Ю.С., Петров А.А. Предупреждение кольматации фильтров гидрогеологических скважин // Разведка и охрана недр. – 1974. – № 7. – С. 56–58.
5. Третьяк А.Я., Швец В.В., Нырклов Е.А. Выбор оптимального поля с целью регенерации скважинных фильтров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 1. – С. 237–244.
6. Выбор оптимального магнитного поля с целью регенерации фильтров гидрогеологических скважин / А.Я. Третьяк, М.Л. Бурда, Д.В. Шайхутдинов, С.А. Онофриенко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2001. – № 4. – С. 121–124.
7. Скважинный фильтр: пат. Рос. Федерация № 2478775; заявл. 04.05.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. – 9 с.
8. Численное моделирование течения в фильтре / А.А. Гарипов, С.Ю. Константинов, Д.Е. Тук, Д.В. Целищев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2013. – Т. 17. – № 3 (56). – С. 153–158.
9. Третьяк А.А., Швец В.В. Фильтр для скважин // Нефть, Газ, Новации. – 2018. – № 11. – С. 78–83.
10. Третьяк А.А., Швец В.В. Скважинный фильтр // Neftegaz.ru. – 2017. – № 7. – С. 44–49.
11. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, Е.В. Одинцов, А.А. Собачкин, Н.Б. Пономарев, А.И. Харитонович. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
12. Скважинный самоочищающийся фильтр: пат. Рос. Федерация № 2681773, заявл. 13.04.2018; опубл. 12.03.2019, Бюл. № 8. – 10 с.
13. Ошовский В.В., Дюбанов А.В. Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов, возникающих в сужающем устройстве // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Хімія і хімічні технології. – 2013. – Вип. 2 (21). – С. 169–179.
14. Edelmeier F., Pope J. 3D woven metal filter cloth doubles filtration flow // Filtration and Separation. – 2017. – V. 54. – № 3. – P. 34–37.
15. Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation / M. Mesquita, F.P. de Deus, R. Testezlaf, L.M. da Rosa, A.V. Diotto // Biosystems Engineering. – 2019. – V. 183. – P. 58–69.
16. SolidWorks Flow Simulation 2012 Tutorial // Docslide. 2014. URL: <https://docslide.us/documents/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.html> (дата обращения 11.06.2019).
17. SolidWorks, «SOLIDWORKS Flow Simulation» // Dassault Systemes Company. 2012–2019. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm> (дата обращения 11.06.2019).
18. CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations / Aniket Shrikant Ambekar, R. Sivakumar, N. Anantharaman, M. Vivekenandan // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 108. – P. 999–1007.
19. Cengel Y.A., Cimbala J.M. Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications. 3<sup>rd</sup> ed. – New York: McGraw Hill Publ., 2014. – 968 p.
20. Navier-Stokes Equations // Comsol: Multiphysics: <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations> (дата обращения 11.06.2019).
21. Скважинный самоочищающийся фильтр. пат. Рос. Федерация № 2685514, заявл. 13.04.2018; опубл. 19.04.2019, Бюл. № 11. – 8 с.

*Поступила 26.08.2019 г.*

#### Информация об авторах

**Третьяк А.А.**, доктор технических наук, доцент кафедры нефтегазовых техники и технологии, декан факультета геологии, горного и нефтегазового дела Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова.

**Кузнецова А.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники факультета информационных технологий и управления Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова.

**Швец В.В.**, аспирант Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова.

UDC 004.94: 622.32

## FLUID FLOW SIMULATION IN THE WELL-TUBE SELF-CLEANING FILTER

Aleksandr A. Tretyak<sup>1</sup>,

130504t@mail.ru

Alla V. Kuznetszova<sup>1</sup>,

alvitkuz@yandex.ru

Vitaliy V. Shvets<sup>1</sup>,

motorsila@yandex.ru

<sup>1</sup> South Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346400, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to create optimal filters, the design and physical principles of which are aimed at slowing down the mudding process, reducing the hydraulic resistance, and, thereby, ensuring a long period of operation.

**The goal** is to design self-cleaning filter constructed in the optimal way in the context of hydrodynamic.

**The object** of the research is the well-tube self-cleaning filter that needs improving fluid flow hydrodynamic parameters through punched holes structure changing.

**Methods:** simulation of fluid flow in the well-tube self-cleaning filter hydrodynamic task using the applicable software pack SolidWorks.

**Results.** The paper describes the design of a particle-retaining borehole self-cleaning filter proposed by the authors and equipped with a system of rotating permanent magnets. The magnetic field created by rotation of the permanent magnets, provides a significant reduction in clogging processes. Further improvement of the design is associated with a decrease in hydraulic resistance, which prevents the pumped liquid from penetrating into the filter cavity. The paper introduces the technique for creating a simulation model to solve the internal hydrodynamic problem of fluid flow in a borehole self-cleaning filter using the SolidWorks application software. Simulation is intended to simulate fluid (water) passage through cylindrical holes in the filter wall in the direction from the outside to the inside. The authors have studied the hydrodynamic effects and the main physical parameters that occur as a result of fluid passing through cylindrical perforations. The performed simulation of the pumped fluid flow in the borehole self-cleaning filter made it possible to establish the optimal drilling pattern for perforation holes in the filter frame and the optimal filter length equal to 0,4 of the formation thickness.

**Key words:**

Well-tube self-cleaning filter, hydrodynamic analyzing, fluid flow in the well-tube filter hydrodynamic simulation, perforations slope angle, software pack SolidWorks.

The study results were obtained in the framework of the Erasmus+ 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP project «Geological education modernization in Russian and Vietnamese universities» MINERAL.

**REFERENCE**

- Gavrillo V.M., Alekseev V.C. *Filtry burovyykh skvazhin* [Drilling well filters]. Rostov-on-Don, Fenix Publ., 2017. 367 p.
- Tang J.S. Fine filter cleaner improves function. *Filtration and Separation*, 2016, vol. 53, no. 5, pp. 42–44.
- Tretiak A.Ya. Teoreticheskie voprosy omagnichivaniya polimernoy promyvochnoy zhidkosti [Theoretical issue of polymer washing fluid magnetization]. *Izvestia vuzov. North Caucasus region. Technical science*, 1994, vol. 3, pp. 46–53.
- Fedorov Yu.S., Petrov A.A. Preduprezhdenie kolmatatsii filtrov gidrogeologicheskikh skvazhin [Prevention of colmatation of filters of hydrogeological wells]. *Exploration and protection of mineral resources*, 1974, no. 7, pp. 56–58.
- Tretiak A.Ya., Shvets V.V., Nyrkov E.A. Choice of the optimum magnetic field for the purpose of regenerating self-cleaning downhole filters. *Izvestiya Tulkogo Gosudarstvennogo Universiteta. Earth Sciences*, 2019, no. 1, pp. 237–244. In Rus.
- Tretiak A.Ya., Burda M.L., Shaikhutdinov D.V., Onofrienko S.A. The choice of the optimal magnetic field with the purpose of regenerating the filters of water wells. *Izvestia vuzov. North Caucasus region. Technical science*, 2011, no. 4, pp. 121–124. In Rus.
- Tretiak A.Ya., Burda M.L., Litkevich Yu.F. *Skvazhinnyy filtr* [Wellbore filter]. Patent RF, no. 2478775, 2013.
- Garipov A.A., Konstantinov S.Yu., Tuk D.E., Tselishchev D.V. Chislennoe modelirovanie tehnicheskoy simulatsii potoka v filtr [Numerical simulation of flow in the filter]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 3 (56), pp. 153–158.
- Tretyak A.A., Shvets V.V. Filter for downhole. *Oil, gas, innovations*, 2018, no. 11, pp. 78–83. In Rus.
- Tretyak A.A., Shvets V.V. Downhole filter. *Neftgaz.ru*, 2017, no. 7, pp. 44–49. In Rus.
- Alyamovsky A.A., Odintsov E.V., Sobachkin A.A., Ponomarev N.B., Kharitonovich A.I. *Kompyuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike* [Computer modeling in engineering practice]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 800 p.
- Tretyak A.Ya., Litkevich Yu., Shvets V.V. *Skvazhinnyy samoochishchayushchiysya filtr* [Wellbore self-cleaning filter]. Patent RF, no. 2681773, 2009.
- Oshovsky V.V., Dubanov A.V. Computer simulation of hydrodynamic effects arising in the narrowing device. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnicheskoho universitetu. Seriya: Khimichna tekhnologiya*, 2013, no. 2 (21), pp. 169–179. In Rus.
- Edelmeier F., Pope J. 3D woven metal filter cloth doubles filtration flow. *Filtration and Separation*, 2017, vol. 54, no. 3, pp. 34–37.
- Mesquita M., De Deus F.P., Testezlaf R., Da Rosa L.M., Diotto A.V. Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation. *Biosystems Engineering*, 2019, vol. 183, pp. 58–69.

16. *SolidWorks Flow Simulation*. 2012. Tutorial. Available at: <https://docslide.us/documents/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.html> (accessed 11 June 2019).
17. *SolidWorks, «SOLIDWORKS Flow Simulation» Dassault Systemes Company*. Available at: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>. (accessed 11 June 2019).
18. Aniket Shrikant Ambekar, Sivakumar R., Anantharaman N., Vivekenandan M. CFD simulation study of shell and tube heat exchangers with different baffle segment configurations. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 108, pp. 999–1007.
19. Cengel Y.A., Cimbala J.M. *Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, McGraw Hill Publ., 2014. 968 p.
20. *Navier–Stokes Equations*. Comsol: Multiphysics. Available at: <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>. (accessed 11 June 2019).
21. Tretyak A.A., Litkevich Yu.F., Shvets V.V. *Skvazhinny samoochishchayushchiysya filtr* [Wellbore self-cleaning filter]. Patent RF, no. 2685514, 2019.

Received: 26 August 2019.

#### Information about the authors

**Aleksandr A. Tretyak**, Dr. Sc., assistant professor, South Russian State Polytechnic University (NPI).

**Alla V. Kuznetsova**, Dr. Sc., assistant professor, South Russian State Polytechnic University (NPI).

**Vitaliy V. Shvets**, postgraduate student, South Russian State Polytechnic University (NPI).