

На правах рукописи

**Котюков Анатолий Борисович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ  
СРЕДСТВ ФИЛЬТРОВАНИЯ ВОДЫ  
В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ**

Специальность 05.20.01 – технологии и средства механизации  
сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киров - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» (ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока).

**Научный руководитель:** **Саитов Виктор Ефимович**, доктор технических наук, профессор, ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, старший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства.

**Официальные оппоненты:** **Шулятьев Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», профессор кафедры технологического и энергетического оборудования.

**Кузнецов Николай Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина», декан инженерного факультета.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита состоится 4 июня 2020 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 006.048.02 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» по адресу: 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166-а, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого» и на официальном сайте научного центра <http://fanc-sv.ru/>.

Автореферат разослан \_\_\_\_ апреля 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Глушков Андрей Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из основных задач развития агропромышленного комплекса России на сегодняшний день является совершенствование животноводческой отрасли, которое позволит укрепить продовольственную независимость страны и ее экономику в целом. Однако за последние 10 лет произошло снижение поголовья коров на 44%, одной из основных причин которого является отсутствие эффективных систем очистки воды.

Качество питьевой воды является одним из наиболее серьезных факторов риска в современном животноводстве и птицеводстве. Организм животных и птицы состоит из воды на 60...70%. Вода служит растворителем, обеспечивает обмен и транспорт питательных веществ, способствует удалению токсических продуктов. У животных и птицы потребность в воде в два раза больше, чем в корме. Таким образом, вода является незаменимым элементом для нормальной жизнедеятельности животных. Наиболее полная и экономичная очистка воды от различных загрязнений до требований нормативных документов является одной из актуальнейших задач развития животноводства.

В настоящее время одним из основных способов очистки воды от указанных загрязнений в системах очистки воды в животноводстве является фильтрация через фильтры с загрузкой из высокоэффективных материалов: волокнистого ионообменного материала (ВИОН), углеродных волокнистых сорбентов (УВС) и активированной углеродной ткани (АУТ). Применяемые фильтры с указанными материалами обладают рядом технологических и конструктивных недостатков: не обеспечивают равномерного распределения расхода в фильтрующем материале, обладают малой производительностью, требуют больших усилий для создания необходимой плотности загрузочного материала, имеют большую массу и габариты, не совмещают в одном фильтре трех технологических операций (механическую, ионообменную и сорбционную очистки), имеют большие потери напора фильтруемой жидкости, а также неравномерная загрязненность фильтрующего материала затрудняет требуемую промывку фильтра. В связи с этим разработка новых технологий и новых конструкций фильтров является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования фильтров основаны на теории фильтрации. Первое упоминание о фильтрах для воды появляется уже в 2000 году до н.э. в Древнем Египте. Теория фильтрации развивалась в работах многих ученых, в частности Леонардо да Винчи. Одними из ученых, благодаря трудам которых теория фильтрации получила широкое развитие в 20-м веке, являются русские ученые Л.С. Лейбензон, П.Я. Полубаринова-Кочина, Н.Н. Павловский.

В нашей стране и за рубежом П.И. Фильчаковым и В.И. Панчишиным, М.Э. Аэровым, О.М. Годесом и Д.А. Наринским, Б.В. Рельтовым, Ю.И. Пахомовым, С.Ф. Гребенниковым, Л.И. Фридманом, В.А. Кожановым и многими другими учеными проведены ряд исследований неравномерности распределения расходов в фильтрах и подобных им установках. Проанализировав труды данных ученых следует, что большинство этих исследований посвящено изучению фильтров и установок с зернистой загрузкой. При этом малоизученным

остается вопрос неравномерного распределения расхода в фильтрах с волокнистой загрузкой, в частности, с применением высокоэффективных материалов (УВС, АУТ и ВИОН). Данный факт замедляет увеличение применения перспективных материалов (УВС, АУТ и ВИОН) в промышленности и быту при совершенствовании конструкции фильтров для очистки воды от различных загрязнений. Настоящая работа может заполнить данную научную нишу, которая посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям характера течения жидкости в фильтрах с УВС с целью повышения эффективности их работы посредством изменения конструкции.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является совершенствование технологии и технических средств фильтрования воды в животноводческих комплексах путем разработки конструкций фильтров с использованием высокоэффективных фильтрующих материалов.

Для решения данной цели определены следующие задачи исследования:

- обосновать и разработать конструктивно-технологические схемы фильтров для применения в животноводстве с целью качественной очистки воды от различных загрязнений;

- выполнить теоретические исследования по обоснованию расхода фильтруемой жидкости по высоте загрузки щелевого фильтра и фильтров с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости, с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку; провести анализ требований к материалу моделей электрогидродинамических аналогий (ЭГДА);

- экспериментально получить значения удельного электрического сопротивления для материалов при создании моделей методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА); изучить распределение расхода жидкости по высоте загрузки щелевого фильтра и фильтров с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости, с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку, использованием метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА);

- провести испытания опытного образца фильтра с центральной перфорированной трубой в технологической линии водоподготовки животноводческого комплекса;

- дать экономическую оценку от внедрения опытного образца фильтра с центральной перфорированной трубой в технологическую линию водоподготовки животноводческого комплекса.

**Научную новизну** работы составляют:

- усовершенствованные технологии и конструкции, позволяющие устранить неравномерность распределения расхода по высоте загрузки фильтров и повысить производительность, упростить создание усилия для достижения требуемой плотности загрузки, повысить компактность фильтров систем очистки воды в животноводстве, совместить три основных вида очистки (механическую, ионообменную и сорбционную), устранить более сильную загрязненность внутренней части загрузки по сравнению с внешней частью за счет новой конструкции фильтров (патент № 2535856 РФ на изобретение, патенты №№

55635, 173754, 175288 и 187521 РФ на полезную модель);

- модель электрогидродинамических аналогий реальных процессов фильтрации жидкости, позволяющая определить необходимую неравномерность распределения отверстий по высоте центральной перфорированной трубы, критерий данной неравномерности, решающий задачу равномерного распределения расхода жидкости по высоте фильтра в системах очистки воды в животноводстве, функциональная зависимость величины усилия при загрузке фильтрующего материала и величины требуемой плотности этого материала.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Содержащиеся в диссертации научные положения и выводы позволяют на стадии проектирования и конструирования обосновать основные конструкционные и технологические параметры технических устройств для очистки воды от различных загрязнений.

Результаты исследований переданы и использованы в ООО Агрофирма «Труд» Пермского края при разработке проекта «Реконструкция фильтров сельскохозяйственного предприятия «Труд», ОАО «Пермская ТЭЦ-6» (г. Пермь) при разработке внутренних конструктивных элементов фильтров по проекту «Реконструкция фильтров цеха химводоподготовки Пермской ТЭЦ-6», а также материалы научных исследований используются в учебном процессе на инженерном факультете ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ.

**Методология и методы исследований.** В качестве объектов исследования выбраны процессы распределения расхода жидкости по высоте загрузки щелевого фильтра и фильтров с центральной перфорированной трубой с нижним и верхним распределением фильтруемой жидкости, а также оснащенного двойной загрузкой использованием метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), опытный образец фильтра с центральной перфорированной трубой с нижним распределением фильтруемой жидкости.

При выполнении диссертационной работы использованы стандартные и частные методики с применением физического и математического моделирования, сертифицированных приборов и современной вычислительной техники с пакетом программ для обработки результатов экспериментов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- конструктивно-технологические схемы фильтров для применения в животноводстве: с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости, с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку;

- теоретические исследования по обоснованию расхода фильтруемой жидкости по высоте загрузки щелевого фильтра и фильтров с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости, с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку; анализ требований к материалу моделей электрогидродинамических аналогий (ЭГДА);

- значения удельного электрического сопротивления для материалов при создании моделей методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА); распределение расхода жидкости по высоте загрузки щелевого фильтра и фильтров с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением филь-

труемой жидкости, с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку, полученные использованием метода электрогидродинамических аналогий (ЭГДА);

- результаты испытаний опытного образца фильтра с центральной перфорированной трубой в технологической линии водоподготовки животноводческого комплекса;

- экономическая оценка применения опытного образца фильтра с центральной перфорированной трубой в технологической линии водоподготовки животноводческого комплекса.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность основных выводов в заключение подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований, положительными результатами испытаний опытного образца фильтра для очистки воды в хозяйственных условиях.

Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на 2-м Международном семинаре «Угольные адсорбенты» (г. Кемерово, 2000 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Водохозяйственный комплекс России: состояние, проблемы, перспективы» (г. Пенза, 2003 г.), семинаре, посвященном 45-летию СТФ ПГТУ «Строительство, архитектура: теория и практика» (г. Пермь, 2005 г.), Международных научно-практических конференциях «Наука-Технология-Ресурсосбережение» (г. Киров, 2014 г.), «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (г. Москва, 2014 г.), «Современные тенденции развития науки и технологи» (г. Белгород, 2016 г.) и «Технические системы и технологические процессы» (г. Стерлитамак, 2018 г.), выставке Московского международного салона образования (г. Москва, ВДНХ, 2019 г.).

По теме диссертации опубликовано 30 работ, в том числе монография, 1 статья в журнале, индексируемом в базах данных Scopus, 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 17 статей в материалах международных конференций, получен патент РФ на изобретение и 4 патента РФ на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка использованной литературы из 177 наименований и приложений. Работа содержит 204 страницы, в которых 71 рисунок, 7 таблиц и 5 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы исследований, научную новизну и практическую ценность выполненной работы, и основные положения, выносимые на защиту.

Научные исследования проведены в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока согласно темы научных исследований лаборатории механизации животноводства и ФГБОУ ВО Пермский ГАТУ по теме научно-исследовательской работы кафедры сельскохозяйственных машин.

В первом разделе «**Современное состояние вопроса и задачи исследований**» рассмотрены санитарно-гигиенические требования к питьевой воде для сельскохозяйственных животных, представлен анализ существующих загрязне-

ний в источниках водоснабжения, применяемых способов и устройств в системах очистки воды в животноводстве и современного состояния вопроса изученности неравномерности распределения расхода по высоте загрузки фильтров, изложены содержание цели и задачи исследования.

Теоретические и экспериментальные исследования М.Э. Аэрова и Н.Н. Умника, П.Ф. Фильчакова и В.И. Панчишина, М.Б. Позина и Н.Л. Гольштейна, Ю.И. Пахомова, I. Linnet, С.Р. Kinny, I. Smith, Т. Akehata, К. Sato и других ученых направлены на изучение неравномерности распределения расхода в загрузке фильтров, химических аппаратов. Вместе с тем, на данный момент недостаточно исследованы вопросы равномерности распределения расхода фильтруемой жидкости в загрузке фильтра с УВС.

В результате выполненного литературно-патентного анализа отечественных и зарубежных конструкций фильтров с УВС, применяемых в животноводстве, установлено, что наиболее распространены фильтры с нижним подводом и отводом среды, которые имеют центральную приемную трубу с щелевыми отверстиями. Площадь указанных отверстий не изменяется по высоте фильтра. Выдвинута гипотеза о существовании неравномерности распределения расхода в данной конструкции фильтра с УВС ввиду предполагаемой разности гидравлических сопротивлений по высоте фильтрующей загрузки. Данное обстоятельство приводит к снижению эффективности применения щелевого фильтра для очистки воды от различных загрязнений.

Показано, что метод проведения исследования путем осуществления замеров непосредственно гидравлических характеристик на исследуемых фильтрах сложен в реализации. Из всех существующих методов исследования наиболее целесообразно применять аналоговый метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА).

Во втором разделе *«Теоретические исследования по совершенствованию конструкций фильтров для очистки воды в животноводческих комплексах»* обоснована гипотеза о неравномерности распределения расхода по высоте загрузки щелевого фильтра, предложены способы устранения данной неравномерности, приведен анализ требований к материалу моделей ЭГДА.

Для теоретического подтверждения гипотезы о неравномерности распределения расхода по высоте загрузки щелевого фильтра были определены потери напора по указанным на рисунке 1 путям WQ и WZVQ. Для этого были использованы формулы определения потерь напора в фильтре при j-м пути фильтрации через различные по высоте зоны материала фильтрующей загрузки:

$$Dh_j = Dh_{1j} + Dh_{2j} + Dh_{3j} + Dh_{4j}, \quad (1)$$

где  $Dh_{1j}$  - потери напора во входном отделении фильтра, м;

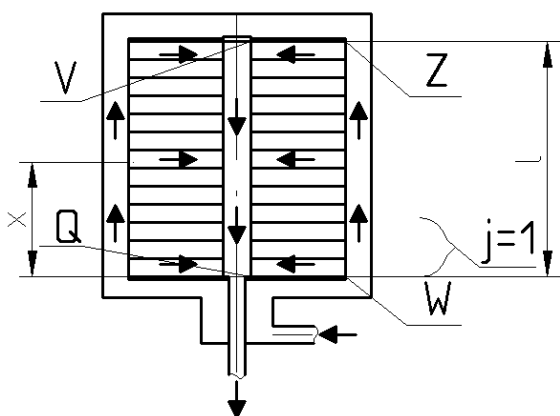
$Dh_{2j}$  - потери напора в материале фильтрующей загрузки, м;

$Dh_{3j}$  - потери напора в выходной трубе фильтра, м;

$Dh_{4j}$  - потери напора от прохождения через отверстия центральной трубы, м.

Определение величины  $dh_{1j}$  выполняли на основе численного интегрирования следующего выражения:

$$dh_{1j} = i \cdot dx = \left[ \frac{(Q_m + Q_p)^2}{K^2} - \frac{2Q_p}{l \cdot K^2} (Q_m + Q_p)x + \frac{Q_p^2}{l^2 \cdot K^2} x^2 \right] dx, \quad (2)$$



где  $dx$  – малый отрезок (элемент) по высоте  $l$  загрузки фильтра, м;

$Q_m$  – транзитный расход во входном отделении, м<sup>3</sup>;

$Q_p$  – расход, непрерывно раздаваемый вдоль высоты  $l$ , м<sup>3</sup>;

$K$  – расходная характеристика.

Рисунок 1 – Схема щелевого фильтра для очистки воды с обозначениями путей прохождения воды:  $\longrightarrow$  – направления движения воды

Величину  $Dh_{2j}$  определяли путем интегрирования представленного выражения:

$$dh_{2j}(t) = \Delta h_{2j}(0) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^4 F_n(r) dr \left\{ \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^4 F_n(r) \left( 1 - \frac{\beta^2 \pi r^2}{S} \right)^{\phi(r) \left( t - \frac{H}{v} \right)} dr \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где  $t$  – момент времени, с;

$r$  – радиус поры (капилляра), м;

$F_n(r)$  – функция распределения пор материала фильтрующей загрузки по размерам;

$\beta^2 \pi r^2$  – площадь поперечного сечения поры на поверхности материала фильтрующей загрузки (перегородки), м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь сечения поры, м<sup>2</sup>;

$\phi(r)$  – функция описания задерживаемых частиц;

$H$  – расстояние до фильтрующей перегородки, м;

$n$  – концентрация частиц.

Для определения величины  $Dh_{3j}$  выполняли численное интегрирование выражения (2) по аналогии с определением величины  $dh_{1j}$ .

Величину  $Dh_{4j}$  определяли по следующей формуле:

$$h_{4j} = \frac{\mu}{2\pi k h} \cdot C_j, \quad (4)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость, кг/(м·с);

$k$  – проницаемость;

$h$  – высота материала фильтрующей загрузки, м;

$C_j$  – геометрическая характеристика, зависящая от количества отверстий и их диаметра.

Результаты численного расчета по указанным выше формулам показали, что гидравлические потери по пути WQ прохождения воды в фильтре  $Dh_{WQ} = 1,171$  м, а по пути WZVQ –  $Dh_{WZVQ} = 1,178$  м. Величина гидравлических по-



терь  $Dh_{wQ}$  меньше величины гидравлических потерь  $Dh_{wzVQ}$ , соответственно больший расход воды пойдет по пути меньшего гидравлического сопротивления. Поэтому в сравнении со всей площадью материала фильтрующей загрузки нижняя ее часть будет больше загрязняться различными примесями. Это приводит к неэффективному использованию площади фильтрующего элемента, снижению качества очистки фильтром воды от различных загрязнений и значительно уменьшает срок использования фильтрующего пакета. Для устранения данного недостатка предложены конструкции фильтров с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости и с центральной перфорированной трубой, имеющей двойную загрузку.

Проведены гидравлические расчеты для фильтра с центральной перфорированной трубой (рисунок 2). Потери напора во входном отделении фильтра определяются по формуле:

$$\Delta h_1 = \lambda \frac{l \times V_{cp}^2}{d_3 \times 2g}, \quad (5)$$

где  $l$  - длина входного отделения,  $l = 0,6$  м;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$V_{cp}$  – средняя скорость по длине входного отделения, м/с;

$\lambda$  - коэффициент гидравлического трения;

$d_3$  – диаметр эквивалентный, м.

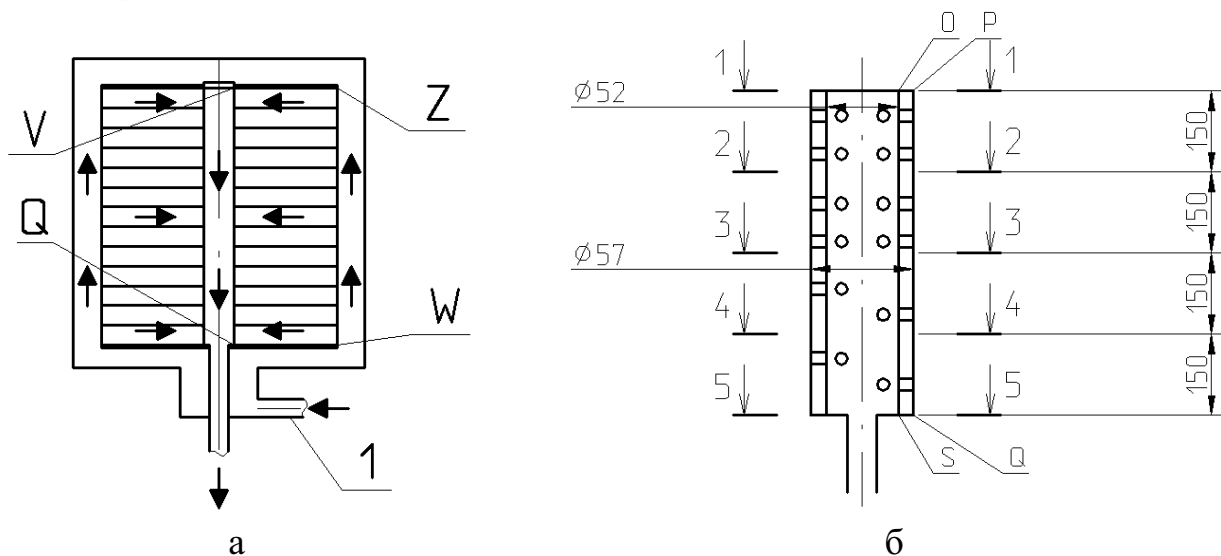


Рисунок 2 – Схема фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой (а) и его центральной трубы (б):  $\longrightarrow$  - направление движения жидкости

Потери напора в загрузке из УВС фильтра определяются по формуле:

$$\Delta h_2 = \Delta h_{загрузкиизУВС} = \frac{V_2 \times l_n}{K_\phi}, \quad (6)$$

где  $l_n$  – длина фильтровального патрона (пути фильтрации в загрузке фильтра);

$K_\phi$  – коэффициент фильтрации, м/с.

$V_2$  – средняя скорость в загрузке щелевого фильтра, м/с.

Проведенные расчеты, когда центральная труба условно разделена снизу-вверх на четыре равные высотные зоны с различным суммарным количеством

отверстий одинакового диаметра в каждой ( $n_{\text{зоны1}} = 47$  шт.,  $n_{\text{зоны2}} = 47$  шт.,  $n_{\text{зоны3}} = 48$  шт.,  $n_{\text{зоны4}} = 48$  шт.), подтвердили, что расходы по пути WQ и по пути WZVQ будут равны благодаря одинаковым гидравлическим сопротивлениям.

Для повышения производительности фильтра рассмотрена его конструкция, имеющая две загрузки с аналогичным суммарным количеством отверстий в каждой и обеспечивающая равномерность распределения расхода по высоте фильтрующей загрузки (рисунок 3).

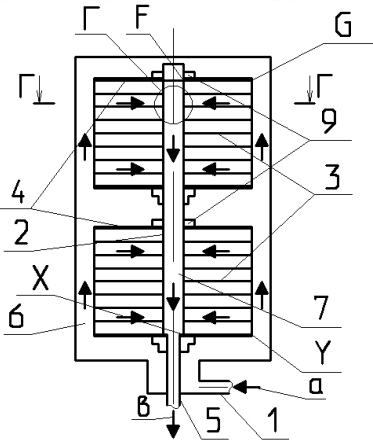


Рисунок 3 – Схема фильтра с центральной перфорированной трубой с нижним распределением фильтруемой жидкости, оснащенного двойной загрузкой: 1 - патрубок подачи очищаемой жидкости; 2 - центральная отводящая труба с перфорацией в виде круглых отверстий; 3 - слой (в виде кольца) из материала УВС или ВИОН; 4 - прижимной фланец; 5 - патрубок отвода очищенной жидкости; 6 - входное отделение; 7 - выходное отделение; 8 - отверстие; 9 - гайка; а, б - направление движения жидкости через фильтр;  $\longrightarrow$  - направление движения жидкости

Аналитически по выражениям (5) и (6) доказана неравномерность распределения расхода по высоте загрузки щелевого фильтра с торцевым подводом жидкости. Также предположена неравномерность распределения расхода жидкости по внешнему периметру загрузки фильтра. Для решения данных проблем в конструкции фильтра с верхним распределением фильтруемой жидкости предусмотрен вертикальный цилиндр, герметично присоединенный к основанию фильтра (рисунок 4).

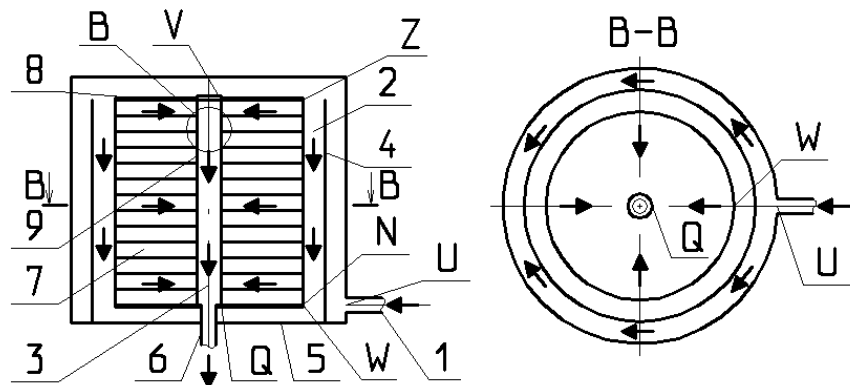


Рисунок 4 - Схема фильтра с центральной перфорированной трубой с верхним распределением фильтруемой жидкости 1 - патрубок подачи очищаемой жидкости; 2 - входное отделение; 3 - выходное отделение; 4 - вертикальный цилиндр; 5 - основание; 6 - патрубок отвода очищенной жидкости; 7 - слой (виде кольца) из материала УВС; 8 - прижимное устройство; 9 - центральная отводящая труба;  $\longrightarrow$  - направление движения жидкости

Благодаря вертикальному цилиндру фильтруемая жидкость поступает к фильтрующей загрузке сверху, в результате исчезает разность гидравлических сопротивлений по высоте загрузки фильтра при условии равенства потерь

напора во входном и выходном отделениях фильтра:  $h_{\text{вход.отд.}} = h_{\text{выход.отд.}}$ . Благодаря вертикальному цилиндру гасится инерционная сила потока, вследствие чего равномерно поток жидкости распределяется по всему входному отделению фильтра.

Для решения проблемы неравномерности расхода жидкости по высоте загрузки предложены фильтры с созданием плотности загрузки нитью или материалом АУТ. При этом необходимо создавать загрузку с большей плотностью в нижних частях фильтра, чем в верхних. Для этого предлагается изменять степень натяжения нити или материала АУТ в нижней и верхней частях загрузки: в нижней части загрузки требуется создать большую степень натяжения, чем в верхней.

Приведен анализ требований к материалу моделей ЭГДА. Установлено, что в качестве материала для создания моделей ЭГДА наиболее целесообразно применять материалы УВС и АУТ, так как данные материалы лучше других удовлетворяют требованиям, предъявляемым к указанным моделям. В соответствии с данными требованиями получена формула электрического сопротивления зоны модели (разбитой на  $n$  подзон с различной толщиной), соответствующей зоне загрузки фильтра:

$$R_{\text{загр.}} = \frac{p_1 \times l_1}{a_1} \times \frac{1}{\delta_1} + \frac{p_2 \times l_2}{a_2} \times \frac{1}{\delta_2} + \dots + \frac{p_n \times l_n}{a_n} \times \frac{1}{\delta_n}, \quad (7)$$

где  $p_1, p_2, p_n$  - удельное электрическое сопротивление соответствующей подзоны;

$l_1, l_2, l_n$  - длина подзоны по линии тока;

$a_1, a_2, a_n$  - ширина подзоны по линии тока;

$\delta_1, \delta_2, \delta_n$  - толщина поперечного сечения подзоны.

Найдена величина отношения потерь напора во входном и выходном отделении и в загрузке щелевого фильтра, которые должны составлять:  $\Delta h_{\text{загр.}} / \Delta h_{\text{вх.отд.}} = 1170,99$ ;  $\Delta h_{\text{загр.}} / \Delta h_{\text{выход.отд.}} = 183$ .

В третьем разделе «**Программа, экспериментальные установки и методика исследований**» в соответствии с поставленными задачами изложена программа исследований, описаны экспериментальные установки, использованные приборы и оборудование, общепринятые и частные методики исследований и обработки экспериментальных данных.

Для проведения исследований с целью определения эпюр распределения расхода жидкости в продольном осевом сечении разработанных фильтров методом электрогидродинамических аналогий изготовлена экспериментальная установка с плоской моделью фильтра ЭГДА (рисунок 5 и 6).

С целью определения эффективности очистки воды разработанным фильтром с центральной перфорированной трубой в системе водоподготовки животноводческого комплекса изготовлен опытный образец фильтра производительностью  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рисунок 7).

Для установления наиболее экономически целесообразных материалов при создании модели фильтра для очистки воды методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) были исследованы углеродный волокнистый сорбент

(УВС) марки АНМ-3, активированная углеродная ткань (АУТ), волокнистый ионообменный нетканый материал (ВИОН), латунная сетка, медная фольга, черная копировальная бумага, бумага, пропитанная раствором поваренной соли NaCl, в сухом состоянии, наждачная бумага и стальной лист.

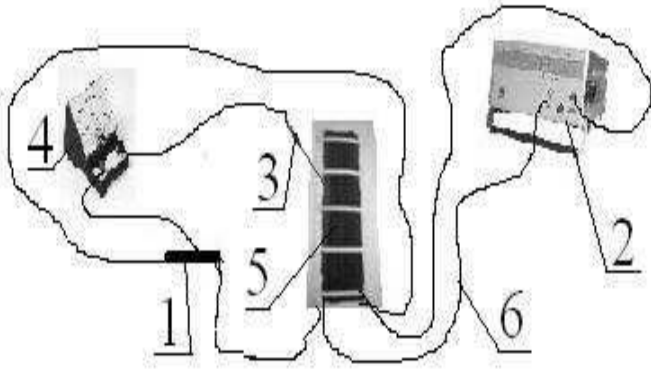


Рисунок 5 - Исследовательская установка с плоской моделью фильтра ЭГДА: 1 - реохорд-полоска УВС; 2 - блок питания постоянного тока Б5-49; 3 - ручка-щуп металлический; 4 - гальванометр; 5 - модель фильтра; 6 - медный провод

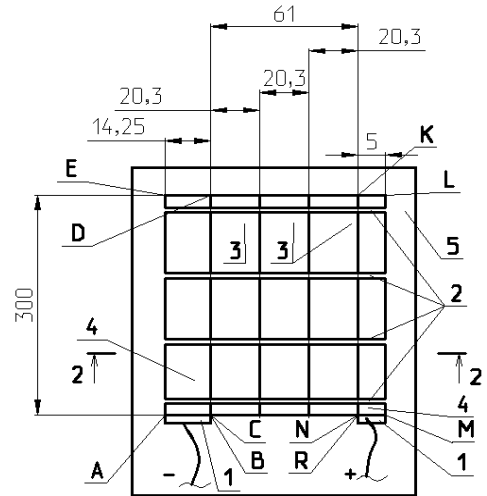
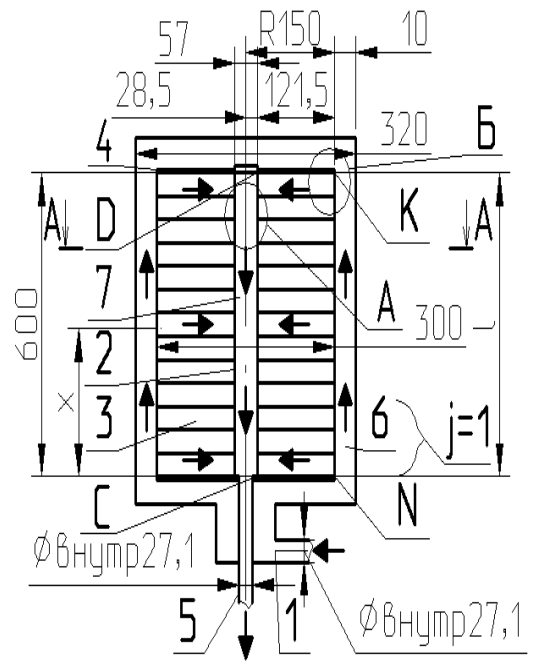


Рисунок 6 - Схема плоской модели щелевого фильтра: 1 - шина (стальной зажим), 2 - полоски из бумаги (ватман), 3 - слой из материала УВС, 4 - материал АУТ, 5 - бумага (ватман)



а



б

Рисунок 7 - Общий вид (а) и схема (б) опытного образца фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой: 1 - патрубок подачи очищаемой жидкости; 2 - центральная отводящая труба с перфорацией; 3 - слой (виде кольца) из материала УВС; 4 - прижимное устройство; 5 - патрубок отвода очищенной жидкости; 6 - входное отделение; 7 - выходное отделение;  $\longrightarrow$  - направление движения жидкости

При исследованиях применялись статистические и численные методы с использованием вычислительной техники. Обработку полученных данных проводили на персональном компьютере при помощи пакета программ по статистической обработке данных.

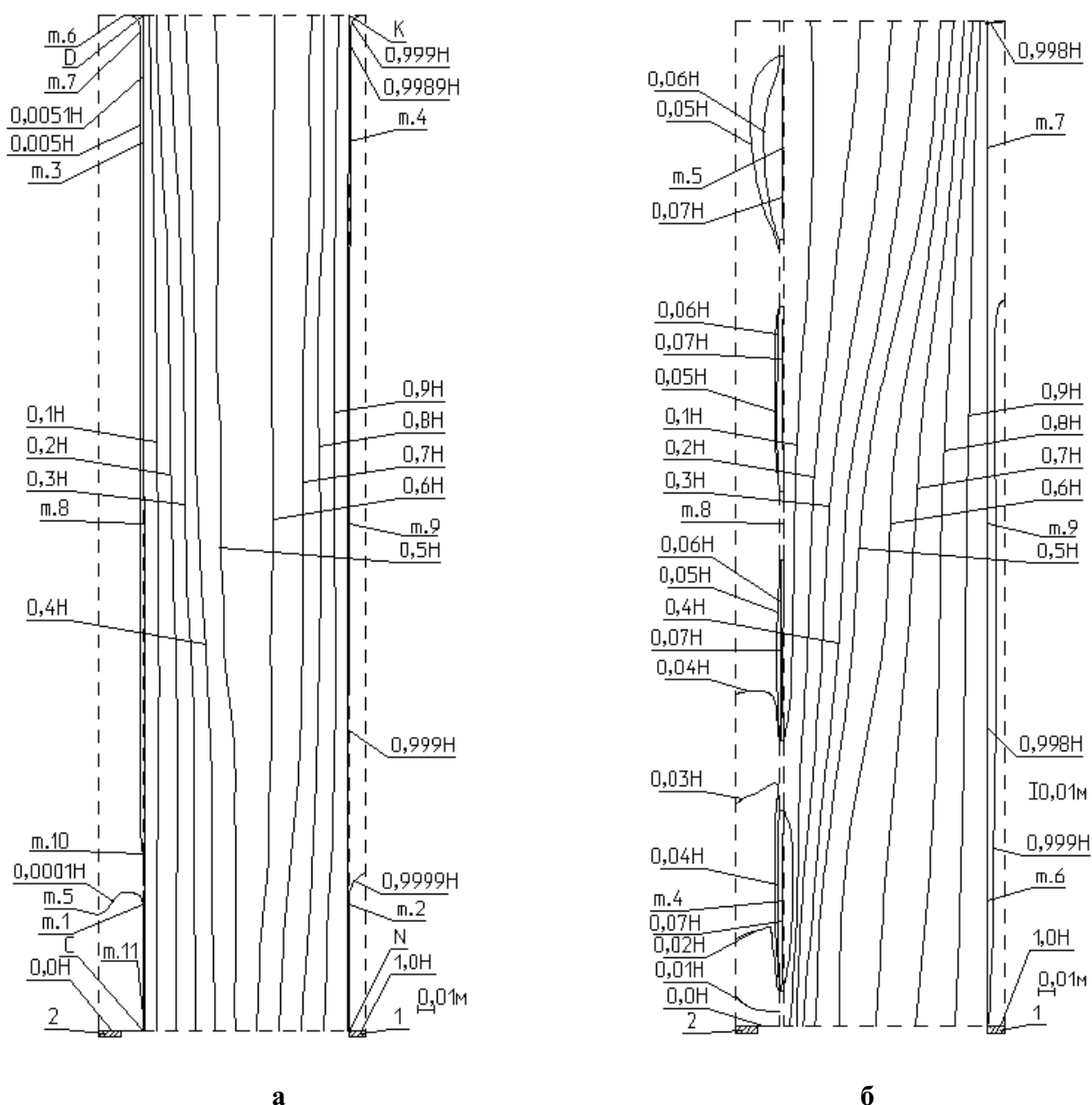
В четвертом разделе «*Результаты экспериментальных исследований фильтров для очистки воды методом электрогидродинамических аналогий*» изложены результаты практических экспериментов по определению электрического сопротивления различных материалов для создания моделей ЭГДА, распределения расхода по высоте загрузки и плотности его упаковки в фильтре.

Результаты проведенных практических исследований по определению электрического сопротивления различных материалов показали, что в качестве материала для создания моделей ЭГДА наиболее целесообразно применять углеродный волокнистый сорбент (УВС) марки АНМ-3 и активированную углеродную ткань (АУТ), которые имеют меньшее удельное электрическое сопротивление  $\rho_{эл} = 5,998$  и  $0,140$  Ом·см и лучше других удовлетворяют требованиям, предъявляемым к указанным моделям.

Подтверждена теоретически предположенная неравномерность распределения расхода по высоте загрузки щелевого фильтра. По кривым равного напора (рисунок 8,а), построенным по полученным экспериментальным данным при плотности загрузки  $\rho = 0,083$  г/см<sup>3</sup> разность величины пьезометрического напора (в долях  $H$ ) в точках 4 и 3 составляет  $\Delta H_{n4-3} = 0,9938H$ , в точках 9 и 8 -  $\Delta H_{n9-8} = 0,99393H$ , а в точках 2 и 1  $\Delta H_{n2-1} = 0,9998H$ . Соответственно  $\Delta H_{n4-3} < \Delta H_{n2-1}$ ,  $\Delta H_{n9-8} < \Delta H_{n2-1}$ . Расход в верхней части фильтра меньше, чем в нижней части.

Для фильтра с центральной перфорированной трубой (рисунок 8,б) разность напоров в точках 6 и 4 равна  $\Delta H_{n6-4} = 0,9255H$ , в точках 7 и 5 -  $\Delta H_{n7-5} = 0,9255H$ , а в точках 9 и 8  $\Delta H_{n9-8} = 0,9255H$ . По линиям равного напора (рисунок 9,а), построенным по полученным экспериментальным данным для фильтра с центральной перфорированной трубой, имеющей двойную загрузку, разность напоров в точках 7 и 5 равна  $\Delta H_{n7-5} = 0,683H$ , в точках 11 и 10 -  $\Delta H_{n11-10} = 0,683H$ , в точках 13 и 12  $\Delta H_{n13-12} = 0,683H$ , а в точках 6 и 4 равна  $\Delta H_{n6-4} = 0,683H$ . Следовательно, данные разработанные конструкции фильтров подтвердили правильность рассчитанной величины необходимого соотношения количества отверстий (количество отверстий возрастает по направлению от нижней к верхней части) в различных зонах центральной перфорированной трубы, позволяющей решить задачу равномерности распределения расхода по высоте фильтрующей загрузки.

У фильтра с верхним распределением фильтруемой жидкости (рисунок 9,б) разность напоров в точках 6 и 4 равна  $\Delta H_{n6-4} = 0,9255H$ , в точках 7 и 5 -  $\Delta H_{n7-5} = 0,9255H$ , а в точках 9 и 8  $\Delta H_{n9-8} = 0,9255H$ . Таким образом следует, что  $\Delta H_{n6-4} = \Delta H_{n7-5} = \Delta H_{n9-8}$ . Это обуславливает равномерность распределения расхода по высоте загрузки фильтра с верхним распределением фильтруемой жидкости и, соответственно, правильность модернизации конструкции щелевого фильтра, оснащенного дополнительным цилиндром.



**Рисунок 8 - Линии равного напора расхода жидкости по живому сечению в модели щелевого фильтра (а) и фильтра с центральной перфорированной трубой (б): 1 - шина «+» (область входа жидкости); 2 - шина «-» (область выхода жидкости)**

Экспериментально определена величина усадки материала УВС марки АНМ-3 и материала ВИОН при насыщении их водой. Для материала УВС марки АНМ-3 данная величина составляет 18,7 %, для материала ВИОН - 29,3 %. Следовательно, при насыщении данных материалов водой требуется меньшее усилие для их сжатия. Данные факты усадки и уменьшения усилия для сжатия объясняются тем, что при уплотнении материала загрузки коэффициент трения скольжения между волокнами сухого материала больше, чем между волокнами, смоченными водой.

Исследована величина усилия (рисунок 10), требуемого для создания загрузки из УВС и ВИОН с различной плотностью. Получены соответствующие зависимости удельного усилия от плотности загрузки  $\rho$ :

$$N_{\text{уд УВС н.в.}} = 4 \cdot 10^8 \rho^3 - 5 \cdot 10^7 \rho^2 + 733762 \rho + 57924 \quad (8)$$

$$N_{\text{уд ВИОН н.в.}} = 4 \cdot 10^8 \rho^3 - 5 \cdot 10^7 \rho^2 + 733762 \rho + 57924 \quad (9)$$

$$N_{уд \text{ УВС с.}} = 2 \cdot 10^{10} \rho^3 - 4 \cdot 10^9 \rho^2 + 4 \cdot 10^8 \rho - 10^7 \quad (10)$$

$$N_{уд \text{ ВИОН н.в.}} = 5 \cdot 10^7 \rho^3 - 3 \cdot 10^7 \rho^2 + 8 \cdot 10^6 \rho - 601403 \quad (11)$$

$$N_{уд \text{ ВИОН с.}} = 5 \cdot 10^8 \rho^3 - 3 \cdot 10^8 \rho^2 + 6 \cdot 10^7 \rho - 4 \cdot 10^6 \quad (12)$$

Где:  $N_{уд \text{ УВС н.в.}}$ ,  $N_{уд \text{ УВС с.}}$ ,  $N_{уд \text{ ВИОН н.в.}}$ ,  $N_{уд \text{ ВИОН с.}}$  - удельное усилие, соответственно, для УВС в насыщенном водой и в сухом состоянии, для ВИОН в насыщенном водой и в сухом состоянии,  $\text{Н/м}^3$ ,  
 $\rho$  - плотность загрузки,  $\text{г/см}^3$ .

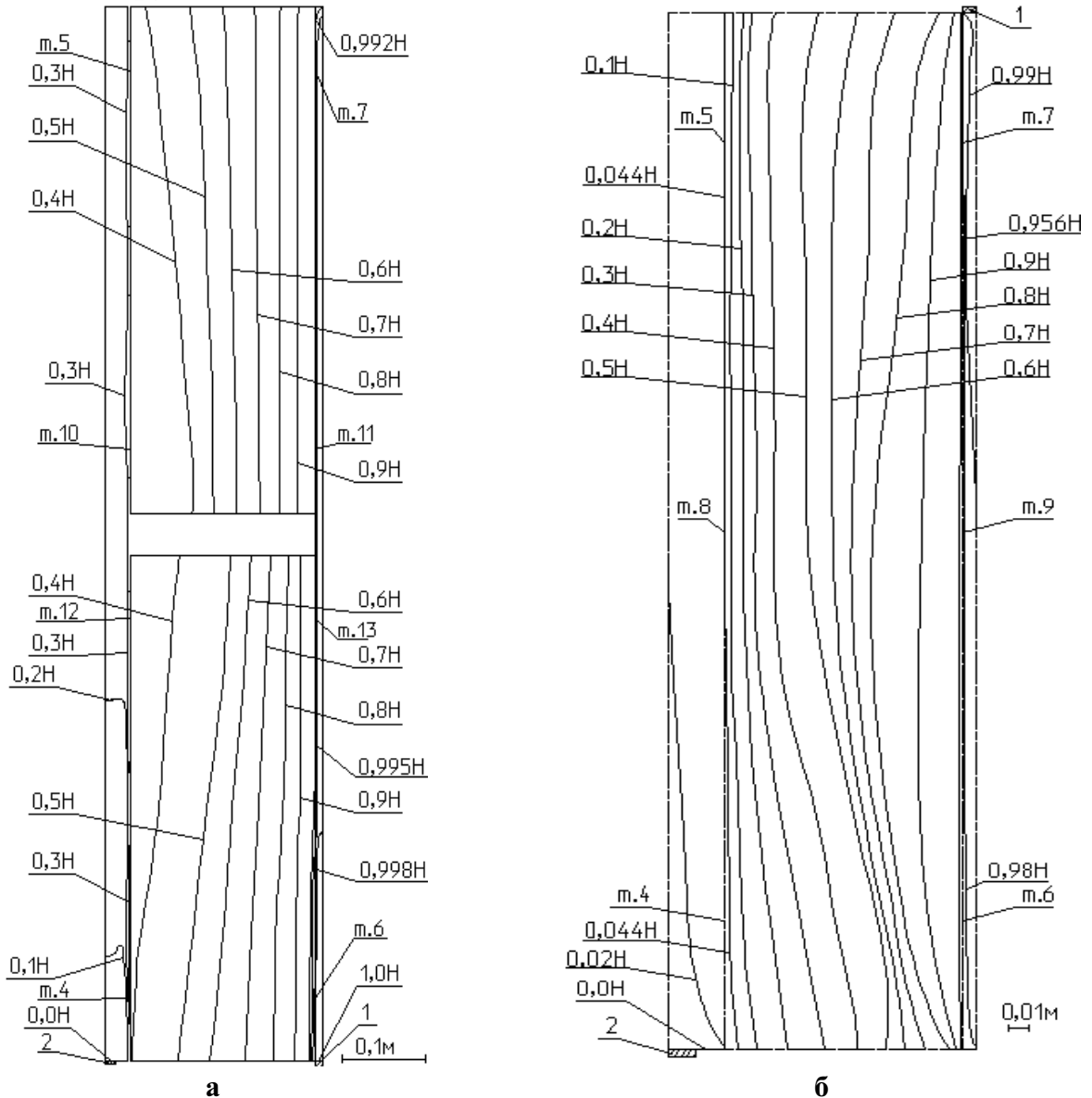


Рисунок 9 - Линии равного напора расхода жидкости по живому сечению в модели фильтра с центральной перфорированной трубой с двойной нагрузкой (а) и фильтра с верхним распределением фильтруемой жидкости (б): 1 - шина «+» (область входа жидкости); 2 - шина «-» (область выхода жидкости)

Графики показывают, что величина требуемого усилия  $N_{уд}$  больше у материала АНМ-3, чем у материала ВИОН при одной и той же степени сжатия. Тем самым открыт путь для создания более совершенных фильтров с УВС, АУТ и ВИОН для животноводства.

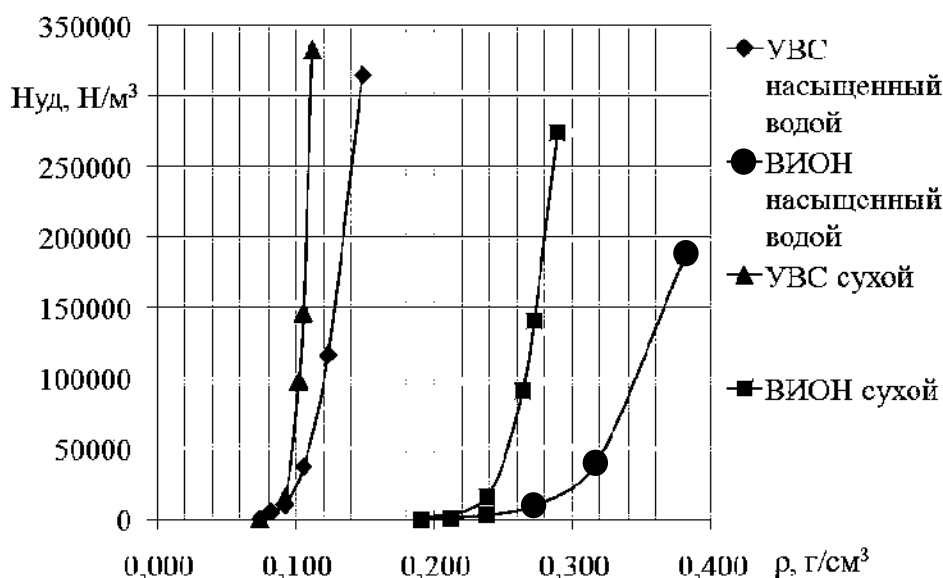
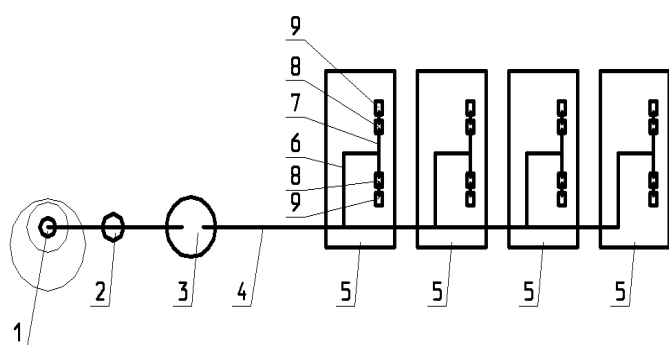


Рисунок 10 - Графики зависимости удельного усилия  $N_{уд}$  от создаваемой плотности загрузки  $\rho$  для материалов УВС и ВИОН

Проведенные экспериментальные исследования привели к практическим рекомендациям, которые реализованы при разработке опытного образца фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой.

В пятом разделе «*Результаты испытаний опытного образца фильтра для очистки воды*» представлены результаты исследований опытного образца фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой, предложены технические решения по совершенствованию конструкций фильтров для очистки воды.

Опытный образец фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой был установлен в системе водоснабжения животноводческого комплекса сельскохозяйственного предприятия Агрофирма «Труд» Кунгурского района Пермского края (рисунок 10)



а

б

Рисунок 11 – Схема водоснабжения (а) и общий вид (б) отделения безпривязанного содержания коров животноводческого комплекса с системой поения: 1 – погружной насос в скважине; 2 – опытный образец фильтра с центральной перфорированной трубой для очистки воды; 3 – водонапорная башня; 4 – магистральный трубопровод; 5 - отделение безпривязанного содержания коров животноводческого комплекса; 6 – система поения коров; 7 - подводящие трубопроводы в системе поения коров 8 – клапаны дозирования подачи воды в поилки; 9 - поилки



Заборная вода, поступающая в технологическую линию водоподготовки животноводческого комплекса из скважины, не соответствовала санитарно-гигиеническим требованиям и была не безопасна для поения сельскохозяйственных животных. Качество воды превышало ПДК по нормативу: по жесткости в 4,79 раза, минерализации в 2,3 раза, запаху, вкусу и цветности в 1,5 раза, пестицидам в 766,7 раза, железу в 1,97 раза, сероводороду в 3,3 раза, нефтепродуктам в 6,2 раза.

После очистки опытным образцом фильтра интенсивность запаха и вкусовые качества воды, оцениваемые по пятибалльной системе, составили 0 баллов – не ощущается, что ниже по нормативу на ПДК, которая не должна быть выше 2 баллов. Показатель по мутности воды составил 1,0 мг/л и улучшился в 2,6 раза в сравнении с нормативом по ПДК. Цветность воды на ферме для поения животных стала меньше  $1^0$ , что выше в 1,3 раза в сравнении с санитарно-гигиеническими требованиями. Содержание пестицидов в воде после ее очистки составило менее 0,0003 мг/л, железа - 0,1 мг/л, сероводорода - 0,002 мг/л, нефтепродуктов - 0,07 мг/л. Данные показатели для пестицидов по нормативу на ПДК не превышают, для железа – ниже в 3 раза, для сероводорода – ниже в 1,5 раза, для нефтепродуктов – ниже в 1,4 раза. Наличие тяжелых металлов (свинца) в очищенной воде также снизилось до 0,01 мг/л, что меньше в 3 раза по сравнению с нормами на ПДК. В результате выделения фильтрующим элементом опытного образца из заборной воды различных примесей общая жесткость ее составила 0,1 мг-экв./л, что ниже в 70 раз по нормативу на ПДК. Степень минерализации профильтрованной воды, то есть общее содержание в ней растворенных веществ имеет значение 28 мг/л, что также меньше в 35,7 раза ПДК по нормативу.

Для создания технических средств фильтрования воды с более эффективным технологическим процессом разработаны конструкции фильтров с УВС, ВИОН и АУТ, позволяющих устранить недостаток малой производительности за счет увеличения объема загрузки и площади фильтрования, а также предложены конструкции фильтров, позволяющих уменьшить величину потери напора в материале загрузки за счет изменения зоны фильтрования, средней скорости в зоне фильтрования, коэффициента фильтрации.

В разработанных конструкциях фильтров решаются проблемы совмещения механической, ионообменной и сорбционной видов очистки в одном фильтре, а также проблема компактности фильтра, включающего устройство для создания требуемой плотности загрузки из материала УВС и ВИОН при большом объеме загрузки.

В шестом разделе *«Технико-экономическая эффективность применения в животноводческом комплексе разработанного опытного образца фильтра для очистки воды»* определена эффективность его применения в сравнении с ближайшим аналогом.

Экономическая эффективность опытного образца фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой в системе водоснабжения животноводческого комплекса проведен в сравнении с щелевым фильтром, как наиболее близким аналогом по конструктивному исполнению и технологическому про-

цессу. Использование в системе водоснабжения животноводческого комплекса опытного образца фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой дает сельскохозяйственному предприятию годовой экономический эффект 79,168 тыс. рублей, а срок окупаемости составляет 0,53 года. Положительный экономический эффект от применения опытного образца фильтра для очистки воды обусловлен снижением приведенных затрат при выполнении технологического процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны конструктивно-технологические схемы фильтров для очистки воды в системе водоснабжения животноводческого комплекса: с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости, с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку, состоящие из герметичного цилиндрического корпуса с входным патрубком, центральной трубы, фильтрующего пакета в виде набора шайб из углеволокнистого материала (УВС), насаженных на снабженную снизу фланцем центральную трубу и сжатых сверху прижимным устройством, входного и выходного отделений и отводного патрубка (патенты РФ № 173754, № 175288 и № 187521).

2. Выражена математическая модель (2 и 3) распределения расхода фильтруемой жидкости по высоте щелевого фильтра, подтвердившая гипотезу неравномерности распределения расхода по высоте его загрузки: расход в верхней части данного фильтра меньше, чем в нижней части. Предложены способы устранения данной неравномерности применением фильтрующих материалов (УВС, ВИОН и АУТ) с помощью неравномерной перфорации центральной трубы, использованием дополнительного вертикального металлического цилиндра и создания неравномерной плотности загрузки фильтрующего элемента.

Теоретически доказана равномерность распределения расхода по высоте загрузки фильтра для очистки воды при выполнении центральной трубы, условно разделенной снизу-вверх на четыре равные высотные зоны, в виде отверстий одинакового диаметра с различным суммарным количеством в каждой зоне:  $n_{\text{зоны1}} = 47$  шт.,  $n_{\text{зоны2}} = 47$  шт.,  $n_{\text{зоны3}} = 48$  шт.,  $n_{\text{зоны4}} = 48$  шт. Для повышения производительности фильтра рассмотрена его конструкция, имеющая две загрузки с аналогичным суммарным количеством отверстий в каждой и обеспечивающая равномерность распределения расхода по высоте фильтра.

Аналитически доказана равномерность распределения расхода по высоте загрузки фильтра с верхним распределением фильтруемой жидкости при установке внутри цилиндрического корпуса дополнительного цилиндра, обеспечивающий поступление жидкости к фильтрующей загрузке сверху и исчезновение разности гидравлических сопротивлений по высоте загрузки при условии равенства потерь напора во входном и выходном отделениях фильтра:

$$h_{\text{вход.отд.}} = h_{\text{выход.отд.}}$$

Предложено для решения проблемы неравномерности расхода жидкости по высоте загрузки нитью или материалом АУТ изменять ее плотность созданием большей степени натяжения в нижней части фильтра, чем в верхней.

Приведен анализ требований к материалу моделей ЭГДА. Получена формула электрического сопротивления зоны модели (разбитой на  $n$  подзон с различной толщиной), соответствующей зоне загрузки фильтра, а также найдена величина отношения потерь напора во входном и выходном отделении и в загрузке щелевого фильтра.

3. Установлены значения электрического сопротивления исследуемых материалов, по которым в качестве материала для создания моделей ЭГДА наиболее целесообразно принять углеродный волокнистый сорбент (УВС), активированную углеродную ткань (АУТ) и волокнистый ионообменный материал (ВИОН), как имеющие наименьшие удельное электрическое сопротивление ( $\rho_{эл} = 5,998, 0,140$  и  $0,053$  Ом·см).

Получены для щелевого фильтра и фильтров с центральной перфорированной трубой, с верхним распределением фильтруемой жидкости ( $h = 0,6$  м и  $D = 0,3$  м), с центральной перфорированной трубой, имеющего двойную загрузку ( $h = 1,2$  м и  $D = 0,5$  м) эпюры расходов по высоте загрузки с плотностью  $\rho = 0,083$  г/см<sup>3</sup> методом ЭГДА. В модели щелевого фильтра расход в нижней части ( $Q_{2-1} = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с) больше, чем в верхней части ( $Q_{4-3} = 0,03 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с). Величина пьезометрического напора (в долях  $H$ ) в разных точках по высоте загрузки для фильтров с центральной перфорированной трубой и с верхним распределением фильтруемой жидкости одинакова ( $\Delta H_{n6-4} = \Delta H_{n7-5} = \Delta H_{n9-8} = 0,9255H$ ).

Получены математические модели о величине усилий, требуемых для создания загрузки из углеродного волокнистого сорбента (УВС) и волокнистого ионообменного материала (ВИОН) с требуемой плотностью: величина требуемого усилия  $N_{уд}$  больше у материала УВС, чем у материала ВИОН при одной и той же степени сжатия.

4. Разработан опытный образец фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой, имеющий внешний диаметр 0,32 м, высоту 0,64 м и обеспечивающий фильтрацию частиц размером 0,0005...0,0018 мкм при рабочем давлении 1,6 МПа и производительности 5 м<sup>3</sup>/ч. Разработанный опытный образец фильтра обеспечивает очистку заборной воды до норм, соответствующим санитарно-гигиеническим требованиям для поения сельскохозяйственных животных: содержание пестицидов по нормативу на ПДК не превышают, для железа – ниже в 3 раза, сероводорода – ниже в 1,5 раза, для нефтепродуктов – ниже в 1,4 раза, общая жесткость ниже в 70 раз, общее содержание растворенных веществ меньше в 35,7 раза, мутность воды улучшился в 2,6 раз, а цветность воды выше в 1,3 раза в сравнении с санитарно-гигиеническими требованиями.

5. Опытный образец фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой подтвердил эффективность его применения в технологической линии водоснабжения животноводческого комплекса. Годовой экономический эффект от использования опытного образца фильтра для очистки воды в системе водоснабжения животноводческого комплекса в сравнении с существующим щелевым фильтром по приведенным затратам составляет 79,168 тыс. рублей при сроке окупаемости 0,53 года.

Теоретические и практические исследования по совершенствованию технологий и технических средств фильтрования воды в животноводческих комплексах путем разработки конструкций фильтров с использованием высокоэффективных фильтрующих материалов представлены в завершенном виде, пригодном для практического применения. Результаты, полученные при решении поставленной научной задачи, явились основой для выработки рекомендаций по совершенствованию технологий и технических средств фильтрования воды.

Предложенные технические решения по совершенствованию конструкций фильтров для очистки воды, позволяющих устранить недостаток малой производительности и уменьшить величину потери напора в материале загрузки, с использованием высокоэффективных фильтрующих материалов (УВС, АУТ и ВИОН) открывают пути для дальнейших научных исследований.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

*Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus*

1. **Kotyukov, A.** Water filter with central perforated pipe for livestock complexes / V. Saitov, **A. Kotyukov** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 403(012159). – pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012159>.

*Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ*

2. **Котюков, А.Б.** Совершенствование фильтров с загрузкой из волокнистых материалов / **А.Б. Котюков**, Ю.П. Петров // Наука и бизнес: пути развития. - 2013. - №8 (26). – С. 80-83.
3. **Котюков, А.Б.** Фильтры с загрузкой из волокнистых материалов и ткани / **А.Б. Котюков**, Ю.П. Петров // Перспективы науки. - 2013. - №8(47). - С. 220-223.
4. **Котюков, А.Б.** Способы модернизации технических средств очистки воды в животноводческих комплексах / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Современные наукоемкие технологии. – 2017. - № 4. – С. 49-55.
5. **Котюков, А.Б.** Исследования распределения жидкости по живому сечению перфорированного фильтра с двойной загрузкой для очистки воды / В.Е. Саитов, **Котюков, А.Б.** // Пермский аграрный вестник. – 2017. - № 2(18). – С. 105-110.
6. **Котюков, А.Б.** Исследования распределения расхода жидкости по высоте загрузки в фильтре для очистки воды с центральной перфорированной трубой / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии. – 2017. - № 2(38). – С. 192-196.
7. **Котюков, А.Б.** Теоретическое исследования по обоснованию неравномерности распределения расхода воды по высоте загрузки фильтра с центральной перфорированной трубой / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии. - 2018. - № 1. - С. 18-20.

*Монографии и рекомендации для науки, производства и образования*

8. **Котюков, А.Б.** Совершенствование устройств очистки воды в животноводческих фермах: Монография / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков**, П.А. Савиных. - Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. - 176 с.

*Статьи в материалах международных конференций*

9. Использование углеродных волокнистых сорбентов (УВС) и волокнистых ионообменных нетканых материалов (ВИОН) в конструкциях фильтров для очистки воды / Ю.П. Петров, **А.Б. Котюков**, Т.А. Щербинина, С.В. Зехов // Вестник Пермского университета. Геология. - 2012. – Выпуск 1 (14). - С. 66-68.

10. **Котюков, А.Б.** Совершенствование конструкции фильтров с загрузкой из материалов УВС, АУТ и ВИОН / **А.Б. Котюков** // Водочистка, 2012. - № 10. – С. 54-58.
11. **Котюков, А.Б.** Конструкции фильтров с загрузкой из материалов УВС, АУТ и ВИОН / **А.Б. Котюков** // Энергосбережение и водоподготовка. - 2012. - № 6 (80). - С.22-27.
12. **Котюков, А.Б.** Совершенствование конструкции фильтров с загрузкой из углеродных волокнистых сорбентов (УВС), активированной углеродной ткани (АУТ) и волокнистого ионообменного материала ВИОН / Ю.П. Петров, **А.Б. Котюков** // Вестник Пермского университета. Геология. - 2013. - Выпуск 2(19). – С. 94-101.
13. **Котюков, А.Б.** Санитарно-гигиенические требования к питьевой воде для животноводческих ферм / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - № 6 (часть 5). - С. 830-833.
14. **Котюков, А.Б.** Способы и применяемые материалы для очистки воды на животноводческих комплексах / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Научное обеспечение устойчивого развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской науч.-практ. конф., посвященной 80-летию Нижегородского НИИСХ. – Нижний Новгород, 2016. – С. 232-235.
15. **Котюков, А.Б.** Определение электрического сопротивления различных материалов для создания модели фильтра для очистки воды методом электрогидродинамических аналогий / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Современные тенденции развития науки и технологий: периодический науч. сб. по материалам XVIII Международ. науч.-практ. конф. - Белгород, 2016. - № 9-1. - С. 57-59.
16. **Котюков, А.Б.** Анализ существующих загрязнений в источниках водоснабжения животноводства / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Состояние и перспективы развития АПК Центрального Нечерноземья: сб. материалов Международ. заочной науч.-практ. конф., посвященной 120-летию создания ФГБНУ Смоленской ГОСХОС. - Стодолище: ФГБНУ Смоленская ГОСХОС, 2016. - С. 273-277.
17. **Котюков, А.Б.** Исследования по определению неравномерности распределения расхода жидкости по высоте загрузки щелевого фильтра для очистки воды / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы X Международ. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: Сб. науч. тр., посвященный 65-летию со дня образования инженерного факультета Вятской ГСХА. - Киров: Вятская ГСХА, 2017. - Вып. 18. - С. 252-256.
18. **Котюков, А.Б.** Применение неравномерной плотности загрузки фильтрующим материалом в технических средствах фильтрования воды / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы X Международ. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: Сб. науч. тр., посвященный 65-летию со дня образования инженерного факультета Вятской ГСХА. - Киров: Вятская ГСХА, 2017. - Вып. 18. - С. 256-259.
19. **Котюков, А.Б.** Устройство с большим объемом загрузки для фильтрования воды в животноводческом комплексе / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2017. - № 2 (часть 2). - С.172-174.
20. **Котюков, А.Б.** Энергосберегающее техническое устройство фильтрования воды для животноводческого комплекса / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков** // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения: материалы Международ. науч.-практ. конф. - Йошкар-Ола: ФГБОУ ВО «Мар. гос. ун-т», 2017. - Вып. XIX. - С. 282-284.
21. **Котюков, А.Б.** Анализ схем и конструкций устройств очистки воды в животноводстве / В.Е. Саитов, **А.Б. Котюков**, П.А. Савиных // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2017. - № 3 (часть 1). – С. 34-39.
22. Совершенствование конструкций фильтров для очистки воды в животноводческих комплексах / В.Е. Саитов, П.А. Савиных, **А.Б. Котюков**, В. Романюк, М. Лукажук //

Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза: Монография под науч. ред. проф. докт. Вацлава Романюка. - Фаленты-Варшава, 2016. - С. 187-194.

23. Теоретические исследования по обоснованию равномерности распределения расхода жидкости по высоте загрузки фильтра для очистки воды с центральной перфорированной трубой / В.Е. Сайтов, П.А. Савиных, **А.Б. Котюков**, М. Лукажук // Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза: Монография под науч. ред. проф. докт. Вацлава Романюка. - Фаленты-Варшава, 2017. - С. 157-165.

24. **Котюков, А.Б.** Разработка для животноводства конструкций фильтров, позволяющих уменьшить величину потери напора в материале загрузки / В.Е. Сайтов, **А.Б. Котюков** // Технические системы и технологические процессы: Сб. статей по итогам Международ. науч.-практ. конф. – Стерлитамак: АМИ, 2018. – С. 85-88.

25. **Kotyukov, A.B.** Requirements for materials to create an effective model filters for cleaning water by electrohydrodynamic analogy / V.E. Saitov, **A.B. Kotyukov** // International Journal of Applied and Fundamental Research. - 2016. - № 2. - URL: [www.science-sd.com/464-25111](http://www.science-sd.com/464-25111) (accessed 06.10.2016).

#### *Патенты на изобретения и полезные модели*

26. Пат. 55635 Российская Федерация, МПК В01D 25/26. Фильтр / **Котюков А.Б.**, Симонова Р.Н. - № 2006107586/22; заявл. 10.03.06; опубл. 27.08.2006, Бюл. № 24.

27. Пат. 2535856 Российская Федерация, МПК В01D 25/26. Фильтрующий элемент для очистки питьевой воды / **Котюков А.Б.**, Петров Ю.П. - № 2013151466/05; заявл. 19.11.13; опубл. 20.12.14, Бюл. № 35.

28. Пат. 173754, МПК В01D 29/11, С02F 1/28, D01B 29/23. Фильтр цилиндрический / Сайтов В.Е., **Котюков А.Б.**, Курбанов Р.Ф., Сайтов А.В. - № 2017118142; заявл. 24.05.2017; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 26.

29. Пат. 175288 Российская Федерация, МПК В01D 29/11, В01D 29/23. Фильтр перфорированный с двойной загрузкой / Сайтов В.Е., **Котюков А.Б.** - № 2017119575; заявл. 05.06.2017; опубл. 29.11.2017, Бюл. № 34.

30. Пат. 187521, МПК В01D 29/11, D01B 29/23. Фильтр перфорированный / Сайтов В.Е., **Котюков А.Б.**, Курбанов Р.Ф., Савиных П.А., Сайтов А.В. - № 2018135320; заявл. 05.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 8.



---

Подписано в печать 27.03.2020 г.  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ № 24.  
Отпечатано в полиграфическом цехе  
ООО «Издательство «Радуга-ПРЕСС»  
г. Киров, ул. Ленина, 83.