

*научный сотрудник Бревнов А.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО НЕПОЛНОПОТОЧНОГО ФИЛЬТРА С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА**

*Запропоновано спосіб визначення конструктивних параметрів гідродинамічного фільтра з закрученням потоку рідини на вході, що має певні переваги в зрівнянні з традиційним гідродинамічним фільтром.*

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

В настоящее время одной из главных задач, стоящих перед человеком является проблема очистки воды от различного рода загрязнений, особенно в регионах с развитой металлургической промышленностью. Техническая вода определенной степени очистки в больших количествах необходима во многих производственных процессах, а природные источники не могут удовлетворить все возрастающие потребности металлургических и коксохимических предприятий.

Известные на сегодняшний день устройства очистки жидкостей от механических примесей обладают рядом преимуществ, обуславливающих область их применения, но присущие им недостатки заставляют нас искать новые пути улучшения тонкости очистки при разумной себестоимости.

В этом плане перспективным является использование закрутки потока очищаемой жидкости в гидродинамических фильтрах.

**Анализ исследований и публикаций.** Закрутка потока, известная как фактор, интенсифицирующий процессы тепломассообмена, реализована в ряде конструкций устройств очистки. Наиболее распространенными являются гидроциклоны и центрифуги [1], [2], но область рациональных параметров каждого из этих устройств очистки не перекрывает всего диапазона возможных условий работы.

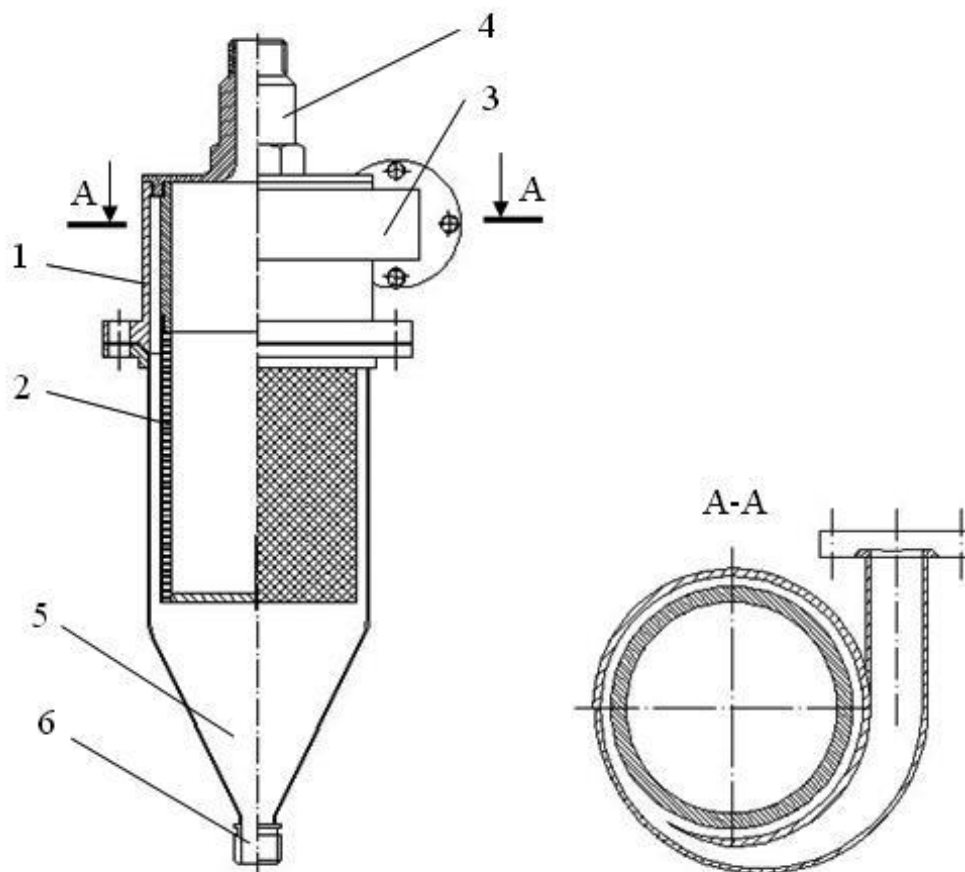
Сочетание сетчатого фильтра и закрутки потока на входе возможно реализовать в гидродинамическом неполнопоточном фильтре [3], где улучшение условий гидродинамического фильтрования, за счет конструктивных особенностей, может быть достигнуто наличием тангенциальной скорости потока, которая может принимать значения, большие, чем осевая скорость.

В работе [3] предложен способ определения рациональных параметров гидродинамического фильтра, использующего закрутку потока.

Кроме того, показана возможность реализации конструкции такого фильтра, обладающего такими преимуществами, как небольшой перепад давления, невысокая чувствительность к параметрам сети, ограждение фильтровальной сетки от твердых частиц, соизмеримых с размером ячейки сетки, а также уменьшение сброса жидкости до 5% от общего расхода.

**Постановка задачи.** Целью исследования является обоснование и расчет конструктивных параметров гидродинамического фильтра с закруткой потока.

**Изложение материала и его результаты.** Схематично гидродинамический фильтр с закруткой потока можно изобразить следующим образом.



1 – цилиндрический корпус; 2 – цилиндрический фильтроэлемент; 3 – патрубок тангенциального подвода очищаемой жидкости; 4 – патрубок отвода очищенной жидкости; 5 – бункер для сбора осажденных частиц; 6 – сливное отверстие для удаления загрязнений.

Рисунок 1 – Общий вид гидродинамического фильтра с закруткой потока.

Принцип работы такого устройства очистки заключается в том, что путем тангенциального подвода неочищенной жидкости через патрубков 3, достигается закрутка потока. После этого закрученный поток попадает в область фильтрования между цилиндрическим корпусом 1 и фильтроэлементом 2, где твердые частицы, соизмеримые с ячейками сетки отбрасываются к внешней непроницаемой поверхности за счет центробежных сил, а более мелкие частицы, определяющие тонкость очистки фильтра отбрасываются от фильтровальной сетки за счет гидродинамического эффекта. Очищенный поток подается на выход 4, а часть неочищенной жидкости (порядка 5 %) идет на сброс 6 через бункер 5.

Схема гидродинамического фильтрования показана на рис. 2. Основной идеей гидродинамического эффекта является непрохождение твердой частицы меньшего размера, чем ячейка фильтровальной сетки за счет большей касательной скорости частицы по отношению к радиальной скорости. Условием непрохождения твердой частицы сквозь ячейку фильтроэлемента является [4] расположение линии действия суммарного вектора скорости выше точки А по рис. 2.

$$\frac{d_p}{2a} > \frac{V_r}{V_\theta}, \quad (1)$$

где  $a$  – размер ячейки сетки,

$V_r$  – скорость жидкости в ячейке фильтровальной сетки,

$V_\theta$  – касательная к поверхности фильтроэлемента скорость потока жидкости.

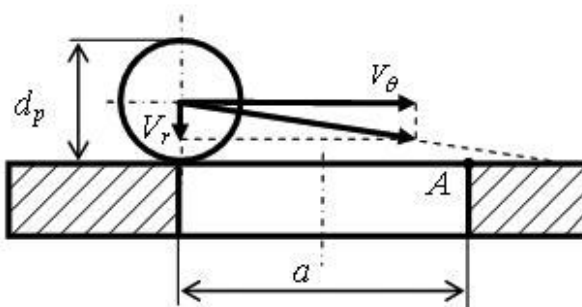


Рисунок 2 – Схема гидродинамического фильтрования

Используя упрощенную модель гидродинамического фильтрования можно определить, при каком соотношении радиальной и касательной скорости твердая сферическая частица диаметром  $d_p$  не проходит сквозь ячейку размером  $a$ .

В работе [5] сказано, что для тонкости очистки равной  $1/3$  размера ячейки в неполнопоточном гидродинамическом фильтре нужно сбрасывать 15-20% поступающей жидкости. Для такой тонкости можно определить отношение касательной скорости к радиальной по формуле:

$$\frac{1}{2 \cdot 3} > \frac{V_r}{V_\theta} \quad (2)$$

То есть для тонкости очистки равной  $1/3$  размера ячейки необходимо, чтобы касательная, по отношению к фильтровальной сетке, скорость твердой частицы была, по крайней мере, в 6 раз больше радиальной.

Для расчетов требуется теоретическое обоснование работоспособности создаваемого фильтра. Полученные при этом теоретические результаты могут быть положены в основу методов расчета фильтров такой конструкции.

Для решения этой задачи были рассмотрены следующие вопросы:

1.) Исследование закрученного течения в кольцевой области с проницаемой стенкой.

2.) Обоснование расчетной схемы и исследование движения взвешенных частиц в таких потоках.

3.) Выбор, обоснование и расчет гидродинамического фильтра с закруткой потока.

4.) Экспериментальные исследования, подтверждающие правомерность теоретического подхода.

В работе [3] обоснована область рациональных режимов работы гидродинамического фильтра с закруткой потока. На основании зависимостей, полученных из равновесия сил, действующих на твердую частицу со стороны потока можно определить основные конструктивные параметры фильтроэлемента при заданном расходе.

В работе [6] проведено исследование закрученного течения в кольцевом зазоре с внутренним проницаемым и внешним непроницаемым цилиндром. В результате решения в итерационном цикле системы дифференциальных уравнений, выведенных из упрощенных уравнений Навье-Стокса, получено распределение трех компонент скорости и распределение давления в исследуемой области.

Но профили осевой скорости имеют форму скачкообразно переходящую из начального профиля к последующему. После чего профили постепенно уменьшаются от сечения к сечению. Скачкообразное преобразование начального профиля говорит о нефизичности процесса. Это может быть обусловлено упрощенной заменой производной от осевой скорости по продольной координате с помощью уравнения неразрывно-

сти. Этот недостаток можно исправить, если заменить  $\frac{\partial U}{\partial z}$  разностным

выражением  $\frac{U - U_0}{\Delta z}$ ,

где  $U_0$  - осевая скорость на предыдущем шаге,

$\Delta z$  - шаг по продольной координате.

Тогда дифференциальное уравнение для определения осевой скорости можно записать в следующем виде

$$U'' = U' \left( \frac{V(r)}{\nu} - \frac{1}{\rho} \right) + U^2 \frac{1}{\nu \cdot \Delta z} - U \frac{U_0}{\nu \cdot \Delta z} + \frac{1}{\nu \cdot \rho} \cdot \frac{dp}{dz}, \quad (3)$$

где  $r$  - радиальная координата,

$\nu$  - кинематическая вязкость жидкости,

$\rho$  - плотность жидкости.

По полученным значениям осевой скорости в разных сечениях и используя уравнение неразрывности, определяем радиальную скорость  $V$  с помощью выражения

$$\int_{r_i}^{r_{i+1}} r \frac{\partial U}{\partial z} dr = -r_{i+1} \cdot V_{i+1} + r_i \cdot V_i. \quad (4)$$

Для определения тангенциальной скорости используем выражение [3]:

$$W'' = \left( \frac{V}{\nu} - \frac{1}{r} \right) W' + \left( \frac{V}{r \cdot \nu} + \frac{1}{r^2} + \frac{U}{\nu \cdot \partial z} \right) W - \frac{U}{\nu} \cdot \frac{W_0}{\Delta z}. \quad (5)$$

В основу решения положен приближенный подход, основанный на сведении уравнений в частных производных к многократному решению ОДУ в итерационном цикле. Особенностью предложенного метода приближенного решения является пошаговое решение в итерационном цикле краевой задачи для обыкновенных дифференциальных уравнений.

Реализованный метод расчета позволяет обнаружить предвестники возникновения обратных течений, такие как предотрывный характер профиля скорости при расчете дифференциальных уравнений закрученного течения жидкости в кольцевом зазоре. Это видно по характеру профиля осевой скорости, особенно вблизи наружной стенки.

Полученное решение отличается тем, что не требует больших вычислительных ресурсов и может быть задействовано в общей методике расчета устройства очистки. В то же время оно дает возможность определить три компоненты скорости жидкости и распределение давления в исследуемых областях.

Решение протестировано на примере известных течений и показывает хорошую сходимость. В качестве иллюстрации результатов расчета на рисунке 3 показаны наиболее характерные профили осевой  $U$  и тангенциальной  $W$  скорости в относительных безразмерных координатах.

$$\bar{z} = \frac{z}{L}, \quad \bar{r} = \frac{r - R_1}{R_2 - R_1}, \quad \bar{U} = \frac{U}{U_{cp}}, \quad \bar{W} = \frac{W}{U_{cp}}, \quad (7)$$

где  $U_{cp}$  - среднее значение осевой скорости в начальном сечении,

$L$  - длина проницаемой поверхности.

Из этих графиков видно, что тангенциальная скорость в области фильтровальной сетки существенно превышает осевую скорость, что является положительным фактором для гидродинамической очистки.

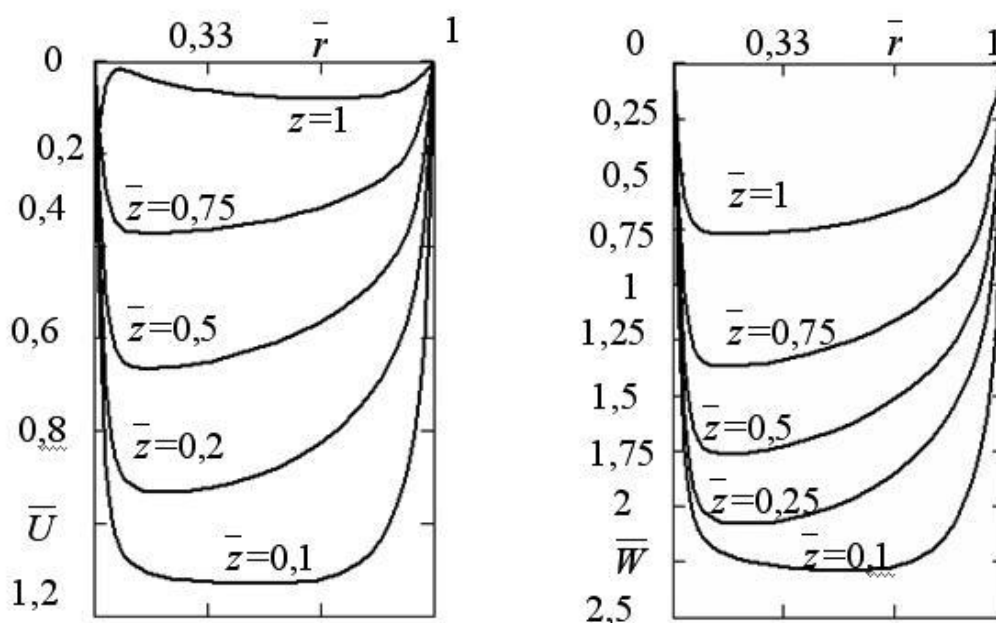
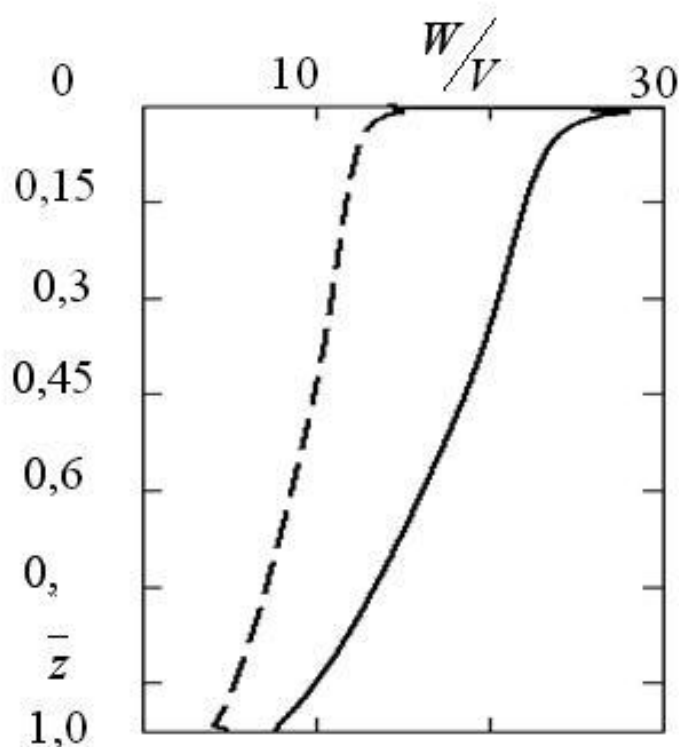


Рисунок 3 – Профили осевой и тангенциальной скорости.

Но для реализации гидродинамического эффекта во всей области фильтрования необходимо иметь отношение касательной скорости к радиальной не менее 6, как было сказано выше, на расстоянии половины размера твердых частиц, определяющих тонкость очистки.

На рис. 4 показаны кривые изменения гидродинамического эффекта по длине области фильтрования на расстоянии 10 и 20 мкм от проницаемой поверхности. По графику видно, что отношение касательной составляющей скорости к радиальной (гидродинамический эффект) уменьшается по мере приближения к выходному сечению, но остается достаточным, чтобы не пропустить сквозь ячейку фильтровальной сетки частицы меньшие размера ячейки даже при небольшом сбросе (порядка 5%).



- — — — — на расстоянии 10 мкм от проницаемой поверхности;
- - - - - на расстоянии 20 мкм от проницаемой поверхности.

Рисунок 4 – Отношение касательной скорости к радиальной

Следующей задачей, которую необходимо было рассмотреть для решения поставленных целей – это задача о движении взвешенной твердой частицы в потоке жидкости в условиях кольцевой области фильтрования, характерной для рассматриваемой задачи.

В работе [7] была представлена постановка задачи о движении твердой частицы под действием сил со стороны потока. В результате численного решения задачи о движении сферической твердой частицы на основе рассчитанного заранее поля скоростей в расчетной области по виду траекторий движения частиц можно более точно судить возможности незасорения проницаемой поверхности частицами определенного размера.

Следующей задачей работы был комплексный расчет всего устройства очистки по схеме, представленной вначале.

### **Общая методика расчета гидродинамического фильтра с закруткой потока:**

1. С помощью оценочного анализа сил, действующих со стороны потока на твердую сферическую частицу определяем размеры фильтроэлемента при соблюдении условия непопадания частицы соизмеримой с размером ячейки на фильтровальную сетку.

2. Путем решения задачи, основанной на решении упрощенных уравнений Навье-Стокса в итерационном цикле определяем величину кольцевого зазора из условия отсутствия признаков появления обратных течений. При этом получаем картину распределения трех компонент скорости потока и распределение давления в области фильтрования. По результатам расчета течения строим функцию отношения касательной составляющей скорости потока к радиальной составляющей в окрестности проницаемой стенки, которая показывает возможность реализации гидродинамического эффекта по всей длине области фильтрования.

3. Решаем задачу движения твердой сферической частицы в рассчитанном поле скоростей из условия непопадания твердой частицы диаметром, соизмеримым с размером ячейки сетки, на внутреннюю поверхность фильтра.

4. При полученных в расчете геометрических параметрах подсчитываем перепад давления на фильтре. При необходимости можно откорректировать геометрические размеры фильтра и повторить процедуру расчета сначала.

При расчете поля скоростей нужно учитывать, что кольцевой зазор с одной стороны должен быть достаточно большим, чтобы уменьшить трение о стенки канала и обеспечить беспрепятственное прохождение твердых частиц примесей в потоке при сравнительно небольшой концентрации, а с другой стороны достаточно маленьким, чтобы уменьшить вероятность появления турбулентных вихрей и исключить возникновение обратных течений в осевом направлении.



На основе проведенного исследования была разработана конструкция гидродинамического полнопоточного фильтра, приведенная на рис. 5, в котором реализованы все те преимущества, о которых я упоминал ранее. Экспериментальный образец неполнопоточного фильтра с закруткой потока на входе, представленный на рис. 5, рассчитан на  $Q=2$  м<sup>3</sup>/час с тонкостью очистки 25 мкм.

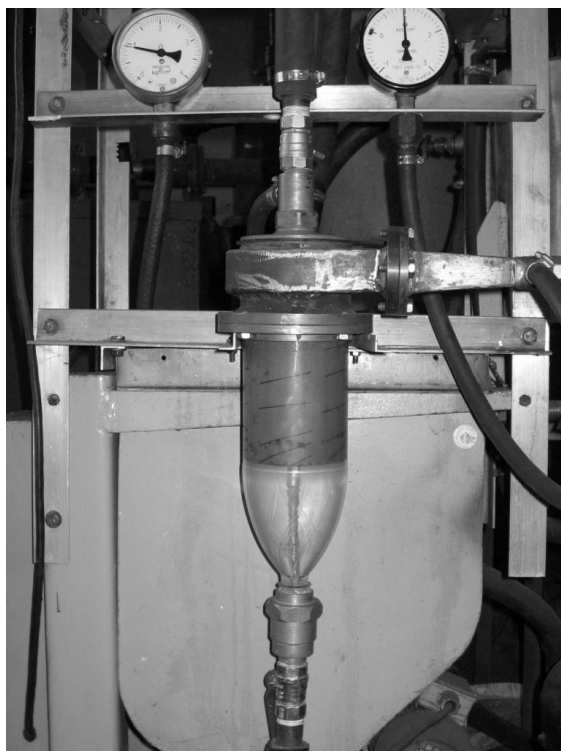


Рисунок 5 – Общий вид фильтра

Представленный макет гидродинамического фильтра с закруткой потока был подвержен экспериментальным исследованиям для воды с концентрацией взвешенных твердых частиц  $c = 0,02$  плотностью  $\rho_p = 2100$  кг/м<sup>3</sup>. После 30 часов работы фильтровальная сетка осталась практически чистой (рис. 6). Перепад давления на фильтре составил 0,01-0,015 МПа. Эффективность очистки жидкости на фильтровальной сетке с размером ячейки 71 мкм от частиц размером 25 мкм при расходе в линии сброса 5% от общего расхода составила 94,67%. Анализ под микроскопом показал, что в пробах очищенной жидкости практически отсутствуют частицы, размер которых превышает 25 мкм.

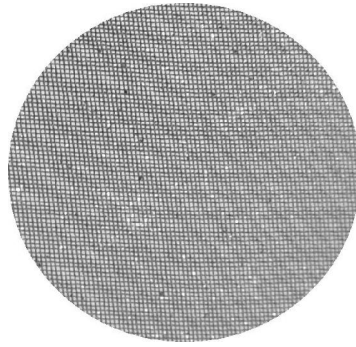


Рисунок 6 – Элемент фильтровальной сетки №0071 после работы в течение 30 часов

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате проведенного исследования можно сказать, что предложенная методика дает возможность рассчитать основные конструктивные параметры гидродинамического фильтра, использующего закрутку потока.

Направлением дальнейших исследований является проведение численных и экспериментальных исследований по определению ширины кольцевого зазора, с целью уменьшения потока на сброс до минимально возможных значений без ухудшения качественных показателей работы фильтра.

*Предложен способ расчета конструктивных параметров гидродинамического фильтра с закруткой потока жидкости на входе, который имеет определенные преимущества в сравнении с традиционным гидродинамическим фильтром.*

*The way of definition of the hydrodynamic filter parameters with twist of fluid flow in the entrance section, having the certain advantages in comparison with the traditional hydrodynamic filter is offered.*

#### **Библиографический список.**

1. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: «Недра», 1978, - 232 с.
2. Соколов В.И. Современные промышленные центрифуги. М.: «Машиностроение», 1967 – 523с.
3. Бревнов А.А. Исследование влияния закрутки потока на работу гидродинамического фильтра с неподвижным фильтроэлементом. Збірник наукових праць «Технологія і техніка друкарства». – К.: ВПІ НТУУ «КПІ», – 2006. – № 4(14), – с.64-72.
4. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. – М.:Недра, 1986.-232 с., с ил.

5. Коваленко В.П., Финкельштейн З.Л. Смазочные и гидравлические масла для угольной промышленности: Справочник. – М.: Недра, 1991. – 294 с.: ил.

6. Бревнов А.А., Мочалин Е.В. Расчет поля скоростей закрученного потока в кольцевой области с проницаемой стенкой. Вісник Сумського державного університету, 2003.- №12(58).- с.65-69.

7. Мочалин Е.В., Бревнов А.А. К постановке задачи о движении взвешенной частицы в закрученном потоке несущей жидкости между двумя соосными цилиндрами с учетом отсоса жидкости через внутренний цилиндр. – Сборник научных трудов. Алчевск: ДГМИ, 2001. - №13. - с.210-218.