

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИВНОЙ ПРОМЫВКИ ТРАКТОВ СУДОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК И СИСТЕМ

Е. М. Аин, канд. техн. наук, А. Г. Горобец, канд. физ.-мат. наук
(ГОУ «Севмашвтуз» — филиал СПбГМТУ),

А. А. Захаров (ОАО НИПТБ «Онега», e-mail: niptb@onegastar.ru),

В. С. Никитин, докт. техн. наук (ОАО ЦС «Звездочка»)

УДК 621.436-192:629.5

Ресурс и эксплуатационная надежность оборудования систем различного назначения зависят от чистоты внутренних полостей, тщательной очистки которых можно предотвратить преждевременное изнашивание ответственных элементов и увеличить продолжительность их безотказной работы. Именно поэтому требования к чистоте внутренних полостей и трактов являются обязательными практически для всех систем и энергоустановок, включая ядерные. Эти требования изложены в соответствующих нормативных документах, распространяющихся только на определенные виды техники, так как отрицательное воздействие примесей рабочих сред и загрязнений на эксплуатационную надежность оборудования зависит от характера загрязнений, особенностей конструкции, режимов работы, наличия в составе систем ответственных элементов с движущимися частями и малыми зазорами. Например, требования к чистоте внутренних полостей элементов ядерных паропроизводящих установок содержатся в [1]. В то же время опыт машиностроения, описанный в работе [2], позволил сделать ряд общих выводов:

- продолжительность промывки достаточно велика, например, процесс очистки деталей, агрегатов и систем современных машин достигает 10—15% от общих затрат времени на их изготовление и сборку [2], а примерная трудоемкость промывки трубопроводных магистралей гидросистем может составлять 40%;
- большая часть загрязнений имеет неорганический характер, а органические составляют 15—20% от общего количества;
- среди неорганических загрязнений примерно 75% по массе составляют металлы, их оксиды, а также кварц и корунд;
- гранулометрический анализ состава реальных загрязнений показал, что размеры частиц составляют от долей до сотен микрометров, во многих случаях от 5 до 100 мкм;
- в смеси реальных загрязнений преобладают обычно мелкие частицы, а их распре-

деление по размерам, по некоторым данным, близко к логарифмическому закону;

- загрязнения попадают внутрь машин на всех этапах их жизненного цикла;
- при изготовлении, сборке и испытаниях машин загрязнения проникают внутрь в связи с особенностями проекта, условиями производства и качеством рабочих сред;
- уровень загрязнений зависит от культуры производства и особенностей технологий;
- при испытаниях машин и их элементов требуется проведение контроля чистоты на основании результатов анализа проб рабочих жидкостей; появление в пробе металлических частиц загрязнений определенной формы и размеров свидетельствует о процессах приработки деталей, их износе и разрушениях;
- эксплуатационные загрязнения, во-первых, генерируются машинами в результате износа их деталей, а во-вторых, попадают в рабочие полости извне. Важную информацию о внутренних процессах представляют пробы рабочих сред. Необоснованно частое вскрытие машин приводит к дополнительным загрязнениям; влияет и уровень загрязненности окружающей среды;
- уровень загрязнения рабочих полостей зависит и от чистоты технологических, в частности, промывочных жидкостей, поэтому необходим контроль их чистоты;
- требуемая степень чистоты полостей и рабочих сред для конкретных агрегатов, систем, установок и машин устанавливается по результатам анализа размеров, материала, количества частиц загрязнений и их влияния на показатели надежности наиболее ответственных элементов [2]. Качество промывки определяется чистотой промывочной жидкости. В судостроении эта проверка выполняется следующим образом: количество частиц загрязнений на единице площади фильтроэлемента технологического стенда сравнивается с утвержденным эталоном. Для воздушных систем критерием чистоты является массовая концентрация масла в пробах хладагента, играющего роль промывочной среды.

Физика процесса очистки поверхностей. Известно, что загрязнение поверхности происходит вследствие адсорбции вещества из газообразной или жидкой среды, а также адгезии (прилипания). Сорбция может быть физической и химической. При физической сорбции между стенкой и сорбируемыми молекулами возникают электростатическая поляризация и дисперсионные силы. При этом сорбируемые молекулы и решетка сорбента остаются двумя независимыми системами. При хемосорбции сорбируемые молекулы и решетка сорбента образуют единую систему. Энергия связи при физической сорбции составляет от 4 до 12 кДж/моль, а при хемосорбции — от 42 до 420 кДж/моль [3]. При хемосорбции процесс очистки состоит из двух этапов: на первом (предварительной стадии) путем физико-химических воздействий (отмочки) разрушается химическая связь загрязнений со стенкой; на втором — лежащая на стенке частица поднимается в поток моющей жидкости и удаляется из тракта. Если первый этап по своему содержанию зависит от конкретных условий, включая характер загрязнений, вид химического соединения, вид рабочей жидкости и т. д., то второй имеет чисто гидродинамический характер во всех случаях. Для удаления частицы из тракта необходимо, чтобы поток моющей жидкости обладал нужной взвешивающей и транспортирующей способностью.

Взвешивающая способность — это возможность удерживать во взвешенном состоянии частицы определенных размеров, определяемая природой и концентрацией взвешиваемого вещества. Для дисперсной среды эта способность обычно характеризуется критическим размером и количеством частиц, которые могут удерживаться данной средой во взвешенном состоянии. Общеизвестно, что устойчивый перенос тяжелых частиц во взвешенном состоянии возможен только в турбулентном потоке жидкости.

Анализ сил, действующих на лежащие на поверхности частицы, показывает, что они находятся под воздействием сил тяжести, адгезии, подъемной силы и лобового сопротивления. Отрыв частицы от по-

верхности возможен, если сумма сил гидродинамического воздействия на частицу превысит силу трения ее о поверхность. Скорость отрыва частиц v_0 , например для частиц размером меньше 50 мкм, может быть определена по формуле, предложенной А. Д. Зимом [4]:

$$v_0^2 = Ak/d, \quad (1)$$

где A — коэффициент, учитывающий параметры потока, свойства жидкости и форму частиц; k — коэффициент, определяющий свойства поверхности, в том числе силу адгезии; d — размер частиц.

Местная скорость потока, обтекающего частицу, может быть определена, например, по следующей формуле [2]:

$$v_y = v_{cp}(y/\delta)^{1/7}, \quad (2)$$

где v_{cp} — средняя скорость потока жидкости; y — расстояние от стенки трубопровода до точки, где скорость равна v_y (интерес представляет $y = d/2$); δ — толщина ламинарного подслоя, определяемая по формуле:

$$\delta = 60R/Re\sqrt{\lambda}, \quad (3)$$

где R — внутренний радиус трубопровода; λ — коэффициент сопротивления трения.

Выполненные оценки показывают, что создание необходимых скоростей потока, особенно для частиц малых размеров, затруднительно и это приводит к увеличению продолжительности промывки.

Уменьшить время промывки можно за счет больших скоростей моющей жидкости вблизи стенки, например, методом интенсивной промывки путем пульсирования. На рис. 1 приведены полученные в данной работе распределения скорости потока в канале при различных скоростях пульсирования. Свидетельством добротности результатов является практически совпадение «дефекта скорости» при нулевой частоте, измеренного и построенного с помощью аппроксимации по известной формуле

$$\frac{U_m - U}{U_*} = \frac{1}{0,36} \ln \frac{R}{y}, \quad (4)$$

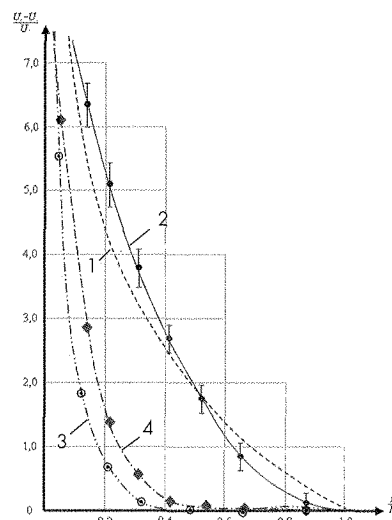


Рис. 1. Распределение скоростей для стационарного и пульсирующего течения в канале диаметром $64,5 \cdot 10^{-2}$ м на расстоянии 58,6 диаметров от входа: 1 — расчет для $f = 0$ Гц по формуле (4). Результаты измерений: 2 — $f = 0$, $Re_d = (1,32 \dots 5,75) \cdot 10^4$; 3 — $f = 65$ Гц, $Re = 5,75 \cdot 10^4$; 4 — $f = 130$ Гц, $Re = 5,75 \cdot 10^4$.

где U_m — скорость на оси трубы; U — скорость на расстоянии y от стенки; U_* — динамическая скорость.

Очевидно, что при пульсировании потока скорости у стенки более высокие. Степень деформации распределения скорости зависит от частоты пульсирования. Наилучший результат получился для частоты 65 Гц.

Технология промывки. Современные методы промывки можно разделить на проточные и интенсивные.

Известны следующие методы интенсивной промывки:

- газожидкостная промывка. В поток моющей жидкости импульсно или непрерывно от отдельной системы подается газ, в результате чего образуется двухфазный газожидкостный поток, имеющий колебательный характер течения и эффективно воздействующий на пристенную область канала, что способствует удалению частиц загрязнений. В случае длинных трубопроводов наблюдается постепенное затухание колебаний, что определяет ограниченные возможности метода [2];

- создание ультразвуковых колебаний в жидкости. Этот метод отличается высокой стоимостью используемых технологических установок, опасностью разрушения деталей при определенных режимах ультразвуковой обработки и низкой эффективностью его применения для

протяженных систем. Поэтому он используется только для очистки небольших прецизионных деталей;

- принудительная кавитация. На входе в очищаемую полость устанавливают кавитационную шайбу или сопло, т. е. сужающее устройство. Вследствие этого в очищаемой полости создается местное разрежение, из жидкости интенсивно выделяются паровые кавитационные пузыри, которые, попадая в область высокого давления, захлопываются. Захлопывание сопровождается локальными гидроударами, интенсифицирующими процесс отрыва загрязнений. Вследствие ограниченной длины кавитационного факела этот способ не может быть применен для промывки длинных каналов и полостей;

- использование акустического гидродинамического излучателя, представляющего собой кольцевое гидродинамическое сопло и колеблющуюся пластину. Колебания пластины в режиме резонанса возбуждают струей жидкости, вытекающей из сопла, и передаются потоком в очищаемую полость, вызывая кавитационные явления. Метод эффективен для удаления сравнительно крупных частиц из коротких каналов;

- гидравлический удар — это мгновенное перекрытие трубопровода, вследствие чего повышается давление и происходит отрыв частиц загрязнений любых размеров. Продолжительность промывки в этом случае снижается в 10—15 раз по сравнению с проточной промывкой. Очевидны технические сложности его реализации;

- нагрев моющей жидкости с целью снижения вязкости. При этом меняется распределение скоростей

по сечению канала, и в пристенной области достигаются более высокие скорости;

- пульсирующий поток. Используется пульсатор [5], при работе которого возникает поток с пульсирующим расходом. Пульсатор может быть включен в тракт при промывке, а может быть подключен параллельно тракту. Используются пульсаторы различной конструкции, например дискового типа. Наложение колебаний расхода также приводит к перераспределению скоростей по сечению и способствует отрыву частиц примеси от стенки;

- изменение направления движения моющей среды. С помощью переключателя создается неустановившийся поток, и продолжительность промывки сокращается на 30—40% [5];

- введение высокомолекулярных полимеров, например полиакриламида. Недостатком метода являются трудности удаления полимера из системы после его использования;

- комбинированное воздействие. Приведенные способы интенсификации основаны на использовании в основном одного воздействия на процесс эвакуации загрязнений из трактов. В то же время возможно одновременное воздействие нескольких силовых эффектов. Например, это может быть закрутка потока жидкости в газожидкостном методе.

В рамках данной работы было выполнено систематическое исследование газожидкостного метода с использованием закрутки. Широко использовалась визуализация течений. Жидкостная составляющая газожидкостного потока под действием центробежных сил приобретает форму кольцевого течения у стенок трубы,

а приосевая область занята газом. Газовый поток самозакручивается, приобретает дополнительную устойчивость, сохраняет колебательный характер. Двухфазный поток без изменения структуры преодолевает такие местные сопротивления, как повороты, сужения, путевые расширители и разветвления. Наблюдается спиралевидное течение газового шнура и отсутствие расслоения двухфазного потока на больших длинах трубопровода [6], что позволяет промывать сравнительно длинные трубы. Этот результат согласуется с положениями работы [7], в которой рекомендуется использовать закрученные газожидкостные потоки для промывки трубопроводов длиной до трехсот диаметров.

Рассмотренные методы разработаны для использования в конкретных областях. Выбор метода интенсивной промывки осуществляется на основании результатов сравнения известных методов с учетом следующих обстоятельств: во-первых, сложности применяемого оборудования и его стоимости; во-вторых, эффективности метода; в-третьих, гидравлического сопротивления интенсификаторов; в-четвертых, экологичности, т. е. степени воздействия на окружающую среду.

Анализ показывает, что для промывки трубопроводов и полостей судовых энергоустановок и систем определенные преимущества имеет модифицированный газожидкостный метод с использованием закрутки потока. Уровень объемного газосодержания по рекомендациям [7] достигает 0,9. Газ от внешнего источника по специальной системе подается в тракт непосредственно перед промываемым изделием. Недостатки метода — большой расход газа, сложность технологического стенда, большое гидравлическое сопротивление закрученного потока и существенное воздействие на окружающую среду из-за выброса отработавшего газа. Основные направления совершенствования этого метода: снижение гидравлического сопротивления газожидкостного потока; уменьшение степени воздействия на окружающую среду; обеспечение возможности использования различных газов; упрощение схемы технологического стенда; расширение возможностей метода для промывки длинных трубопроводов.

Примеры трудоемкости и продолжительности промывок систем при ремонте корабля

Наименование системы, трубопровода	Вид промывки	Трудоемкость операции, нормо-ч	Продолжительность операции, рабочие дни
Трубопроводы судовой и рулевой гидравлики	Предремонтная	893	≈25
	Послеремонтная, рабочая	2028	≈25
	Послеремонтная, контрольная	555	≈3
Трубопроводы ВВД	Аварийная	≈2016	≈15
Основные контуры ППУ	Послеремонтная	I контур 6700	≈10 (оба борта)
		II контур — 500 III контур — 400	II контур ≈3 III контур ≈5 (оба борта)
Маслопроводы ГТЗА, АТГ	Послеремонтная	1566	≈30
Трубопроводы КПС	Послеремонтная	1620	≈25

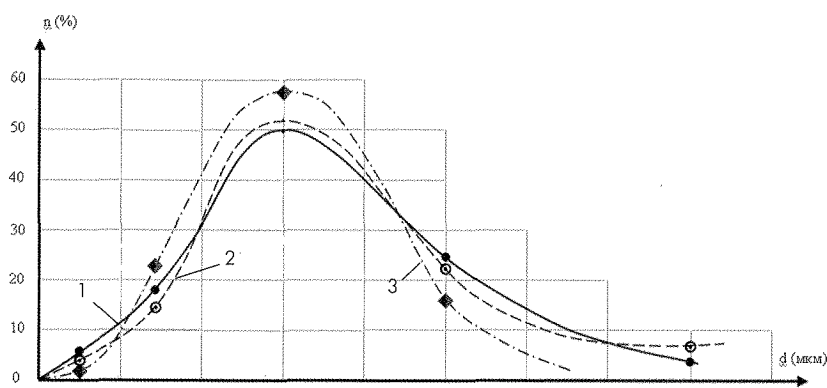


Рис. 2. Распределение загрязнений по размерам частиц:
1 — проба № 1; 2 — проба № 2; 3 — проба № 3

Промывка внутренних полостей оборудования судовых установок и систем отличается высокой продолжительностью и трудоемкостью (таблица). Рассмотрим подробнее усовершенствованную технологию промывки газожидкостным методом контуров судовой паропроизводящей установки.

Характеристика загрязнений внутренней полости контура ППУ.

Анализ загрязнений внутренних полостей, удаленных при послемонтажной промывке, выявил зависимость частоты появления в пробе жидкости частиц разных размеров. Эта зависимость в виде статистического ансамбля показана на рис. 2. Наиболее часто встречаются частицы размером около 60 мкм.

Основную часть загрязнений составляют металлические частицы, реже встречаются песок и абразивная крошка, шлак и обтирочный материал (ворс). Большая часть частиц имеет форму, близкую к параллелепипеду, с отношением стороны основания к высоте, равным 1:4, но встречаются и иглообразные частицы.

Анализ поведения частиц загрязнений в потоке моющей жидкости. Наблюдения выполнялись с использованием методов математического планирования эксперимента. Изучены следующие характеристики: скорость трогания и скорость осаждения частиц, гидравлическая крупность и скорость их вымыва. Результаты представляют собой регрессионные уравнения. Установлено следующее:

✓ форма частиц при отношении высоты к ширине от 3 до 4 на скорость осаждения влияет слабо, также форма иглообразных и близких к кубу частиц слабо влияет на скорость трогания;

✓ гидравлическая крупность, т. е. скорость осаждения исследовалась как функция характерного размера частиц, температуры и плотности. Получено регрессионное уравнение для $d_s = (0,247...1,24)$ мм, $t = (18...60)$ °C в виде (см/с):

$$W_o = 2,2012 + 5,0475d - 0,2075p + 0,0145t; \quad (5)$$

✓ скорость вымыва, которая исследовалась также с использованием

методов планирования эксперимента как полнофакторного, зависит от характерного размера частиц, числа Рейнольдса и плотности материала частиц. Полученное уравнение имеет следующий вид (см/с):

$$W_{\text{вым}} = -27,2094 + 0,8034d_s - 0,0963p + 0,0018Re + 0,0004Red_s. \quad (6)$$

Область его применения $d_s = (0,3...7,8)$ г/см³; $Re = 133\ 300...14\ 600$.

Из уравнения (6) виден эффект взаимодействия факторов — числа Рейнольдса и эквивалентного диаметра частицы;

✓ скорость трогания исследовалась как функция характерного размера, плотности и температуры, варьируемых на двух уровнях. Установлено, что скорость трогания зависит от перечисленных факторов нелинейно.

Необходимый уровень скоростей может быть достигнут любым из перечисленных методов проточной или интенсивной промывки. При этом в большинстве случаев сопротивление потока оказывается неприемлемо большим. Сравнительный анализ показал, что закрученный и разделенный поток позволяет получить нужные скорости у стенки при меньшем сопротивлении, чем при других методах интенсивной промывки. Интересно, что в закрученном и разделенном потоке скорости у стенки выше, чем в незакрученном. Но гидравлическое сопротивление закрученного и разделенного потока примерно такое же, как у незакрученного. Из сравниваемых потоков самое большое сопротивление у закрученного, но неразделенного (рис. 3) [8].

Для получения закрученного разделенного газожидкостного потока моющей среды был разработан специальный технологический стенд.

Технологический стенд для интенсивной промывки с использованием газожидкостного закрученного и разделенного потока. Стенд (рис. 4) работает следующим образом. Промываемое изделие

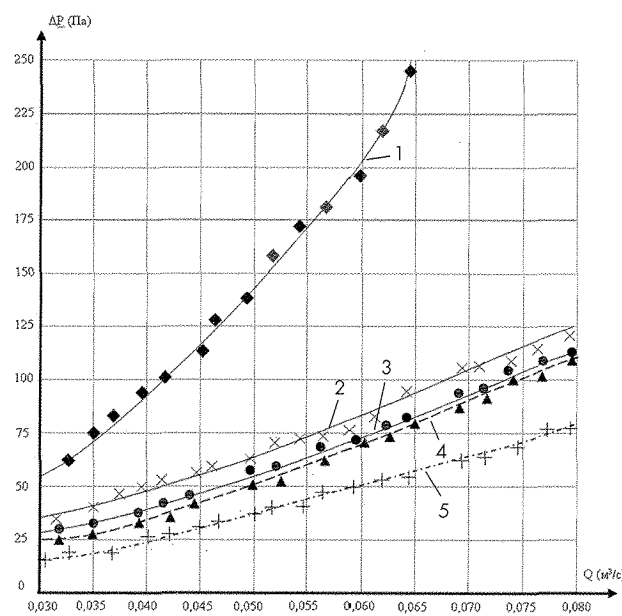


Рис. 3. Зависимость перепада давления от объемного расхода:
1 — установлен завихритель; 2 — отсутствуют завихритель и разделитель; 3 — используется разделитель с двумя секторами; 4 — используется разделитель с тремя секторами; 5 — используется разделитель с четырьмя секторами

25 подсоединяется к напорной магистрали при открытых клапанах 23 и 21. По трубопроводу 20 расходный бак 1 заполняется моющей жидкостью. Клапан 21 закрывается, открывается клапан 12, и бак 1 заполняется газом. После этого закрывают клапан 23 на патрубке 22 и создают в баке 1 небольшой наддув. Затем открывают запорные клапаны 13 или 14, 8 или 9, а также клапаны 11, 19, 17 или 18 и включают насос. При этом газ идет через фильтр 15 или напрямую, а моющая жидкость — через фильтр 7 или напрямую пос-

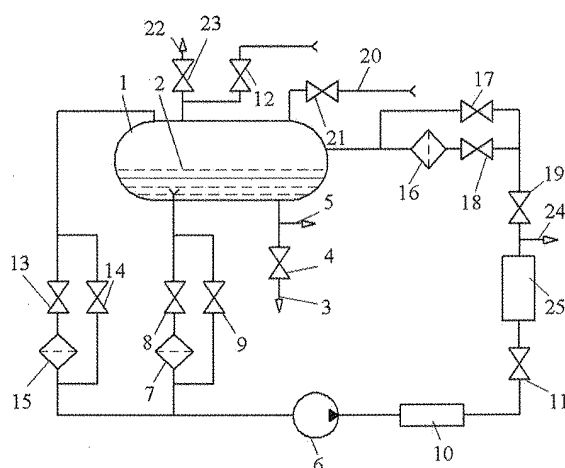


Рис. 4. Стенд для промывки изделий газожидкостным потоком

тупает во всасывающий патрубок насоса. Газ перемешивается с моющей жидкостью и подается на завихритель с разделителем 10, где газожидкостный поток закручивается и поступает в промываемое изделие 25, после выхода из которого через фильтр 16 он напрямую поступает в бак 1, где разделяется газоотделителем 2 на моющий раствор и газ. Цикл повторяется.

Состав газожидкостной смеси регулируют клапанами 13 или 14, 8 или 9. Чистоту газожидкостной смеси и моющей жидкости контролируют с помощью пробоотборников 24 и 5. После промывки выключают насос 6, закрывают клапаны 11 и 9, промываемое изделие отсоединяют от стенда и на его место присоединяют другое. После завершения работы стенда открывается клапан 4, и через сливной патрубок 3 моющая жидкость сливается в сборную емкость.

Стенд прост по конструкции, безопасен в эксплуатации, обеспечивает промывку изделий при замкнутом цикле как по жидкости, так и по газу. Введение газоотделителя

позволяет сократить размеры расходного бака с моющей жидкостью и общую массу стенда. Стенд может быть выполнен переносным и доставлен к промываемому изделию. В предложенном стенде реализуется хорошо зарекомендовавший себя газожидкостный метод промывки [7, 9, 10]. Для эффективного использования метода с целью промывки длинных трубопроводов предусмотрена закрутка потока, а для снижения его гидравлического сопротивления — разделение закрученного газожидкостного потока [8].

Заключение. 1. Технологическая операция промывки трактов и внутренних полостей судовых энергоустановок и систем отличается высокой энергоемкостью, продолжительностью и трудоемкостью, и поэтому ее совершенствование является актуальной задачей.

2. Для ее решения необходимо повысить уровень скоростей моющей жидкости у стенки тракта, но при условии предотвращения существенного роста гидравлического сопротивления.

3. Это оказывается возможным при промывке газожидкостным потоком, закрученным в завихрителе и трансформированным в разделителе.

4. Метод реализуется с помощью технологического стенда, схема которого отвечает современным экологическим требованиям, его газовый и жидкостный тракты замкнуты, отрицательное воздействие на окружающую среду отсутствует.

Литература

1. ОСТ 95.306. Чистота изделий ППУ. Технические требования.
2. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. М.: Строение, 1982.
3. Громова Н. И., Симановский О. М., Яковлев А. А. Дезаэтизация в ядерной промышленности. М.: Энергоиздат, 1982.
4. А. Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Строение, 1976.
5. Яковлев Б. В., Константинов Е. А. Промывочности и промывки оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Яковлев Б. В. Вывод газожиidкостного потока в элестем. Научный отчет по теме «Повышение технологичности продукции». А-1, раздел 1, № гос. регистрации Севсодервинск: Севмашвуз, 1989.
7. Огические рекомендации № ТР-1.4. «Промывка гидравлических систем азоджиidкостной средой». М.: НИАТ, 1984.
8. М., Горобец А. Г., Никитин В. С. Явление трансформации закрученного потока газа при прохождении его через пространственную решетку. М.: Вестник научного открытия № 357 от 2008 г. // Научные открытия. Сб. научных исследований, научных гипотез 2008 г. Российская академия естественных наук/Сост. Поточин М.: МААНОИ, 2009.
9. Огические рекомендации № ТР-1.4. «Промывка труб газожиidкостной М.: НИАТ, 1984.
10. Огические рекомендации ТР. 1.4. «Вывод технически обоснованного промывки трубопроводных систем и отсти от класса частот». М.: НИАТ,