

На правах рукописи

**Овчинников Дмитрий Юрьевич**

**Совершенствование технологии пылеподавления при бурении  
разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров в условиях  
отрицательных температур.**

**Специальность 25.00.14 – Технология и техника геологоразведочных работ.**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Москва 2010 г.**

Работа выполнена на кафедре горного дела в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», РГГРУ.

Научный руководитель: д.т.н. Грабчак Леонид Георгиевич

Официальные оппоненты: д.т.н. Алексеев Виталий Васильевич  
к.т.н. Скопинцева Ольга Васильевна

Ведущая организация: ОАО «Тульское НИГП», г. Тула

Защита диссертации состоится 24 ноября 2010 г в 15:00 в аудитории 4-15 Б на заседании диссертационного совета Д 212.121.05 при Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе.

Адрес: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, РГГРУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГГРУ.

Автореферат разослан 23 октября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Назаров А.П.

**Актуальность проблемы.** Последние годы на предприятиях геологоразведочной и горной отраслей ставится задача полного подсчета запасов полезных ископаемых с полным извлечением разведанного сырья, внедрения новых эффективных способов разведки и систем разработки с одновременным обеспечением максимально возможных безопасных условий труда. Бурение разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров сопровождается выделением силикозоопасной пыли, способствующей заболеванию буровиков и рабочих сопутствующих процессов. Поставленные задачи могут успешно решены путем применения совершенных технологических процессов пылеподавления при бурении с обеспечением безопасных условий труда для работающих.

Настоящая работа посвящена исследованиям пылеподавления при ведении разведочно-эксплуатационных работ на открытых и подземных работах в процессе бурения разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров в условиях отрицательных температур окружающей среды и горных пород, позволяющим значительно (до санитарных норм) снизить запыленность воздуха на рабочем месте буровиков и тем самым сократить вероятность профессиональных заболеваний у вышеупомянутой категории работающих. Степень изученности рассматриваемого в работе вопроса следует признать недостаточной и поэтому исследование процессов, влияющих на эффективность пылеулавливания при бурении разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров является актуальным научным направлением для совершенствования технологии бурения в период ведения разведочно-эксплуатационных работ.

**Цель работы.**

Повышение качества воздушной среды в рабочей зоне бурильщика при ведении разведочно-эксплуатационных работ на открытых и подземных геологоразведочных работах в условиях отрицательных температур.

**Идея работы.**

Применение технологии мокрого пенного пылеулавливания при бурении в условиях отрицательных температур с комплексом методов обеспыливания для обеспечения санитарных норм по запыленности.

**Основные задачи исследований.**

- обобщить и проанализировать литературные источники по технологии и методам пылеподавления при бурении в условиях положительных и отрицательных температур;
- изучить горно-технические условия бурения разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров в условиях отрицательных температур;
- выполнить теоретическую оценку изменения температуры по глубине массива горных пород и по всему буровому тракту;
- определить факторы, влияющие на физико-химические свойства растворов поверхностно активных веществ (ПАВ) с антифризными добавками и установить качественные и количественные закономерности влияния параметров пылеулавливающего раствора на эффективность пылеулавливания;

- определить влияние температурного фактора на поверхностное натяжение раствора и температуру образующейся пены;
- установить оптимальные параметры пенного пылеуловителя для пылеподавления при бурении в условиях отрицательных температур;
- разработать практические рекомендации по технологии пылеподавлению при бурении в условиях отрицательных температур с использованием мокрого пенного пылеуловителя.

**Фактические материалы.** В данной диссертации излагаются материалы, собранные и обработанные автором в период 2006-2010 г.г.

В ходе работы автором были проведены:

- теоретические исследования влияния физико-химических свойств растворов с ПАВ на эффективность пылеулавливания;
- теоретические исследования по изучению распределения температуры в массиве горных пород с глубиной и температуры воздуха при бурении по всему буровому тракту;
- теоретические исследования по механизмам улавливания частиц пыли растворами ПАВ и пузырьками ВМП;
- экспериментальные исследования влияния концентрации ПАВ и антифризной добавки на пылеулавливающую способность растворов;
- исследования влияния дисперсионного и химического состава пыли на эффективность пылеулавливания;
- исследования влияния параметров раствора на параметры воздушно-механической пены (ВМП);
- исследования влияния плотности, вязкости, температуры растворов ПАВ, концентрации антифризной добавки на величину их поверхностного натяжения;
- исследования влияния конструктивных параметров мокрого пенного пылеуловителя на эффективность пылеулавливания.

**Научная новизна.**

- получены зависимости коэффициента пылеулавливания мокрого пенного пылеуловителя при бурении от концентрации в растворе ПАВ, антифризной добавки и параметров улавливаемой пыли;
- установлены зависимости изменения температуры ВМП от температуры раствора и окружающей среды;
- выявлена зависимость величины поверхностного натяжения раствора от концентрации антифризной добавки и температуры раствора от +5°C до -14°C.

**Методика исследований.** Поставленные в диссертационной работе задачи решались комплексным методом исследований, включающим обобщение и анализ литературных данных по пылеподавлению в условиях положительных и отрицательных температур применительно к бурению скважин и шпуров, теоретические и экспериментальные исследования, анализ и обобщение полученных результатов, разработку практических рекомендаций. Обработка результатов исследований проводилась с использованием методов математической статистики.

**Достоверность научных выводов и рекомендаций.** Практические рекомендации и защищаемые научные положения обоснованы необходимым объемом теоретических и экспериментальных исследований и достаточной сходимостью опытных данных с результатами ранее проведенных теоретических исследований.

**Практическая ценность.** Разработанные автором зависимости и разработанные рекомендации позволяют:

- обосновать выбор параметров раствора ПАВ, применяемых в мокрых пылеуловителях для пылеподавления при бурении;
- установить коэффициент пылеулавливания мокрого пенного пылеуловителя в зависимости от физико-химических свойств раствора ПАВ с антифризными добавками;
- оценить влияние температуры окружающей среды и массива горных пород на эффективность пылеулавливания мокрыми пенными пылеуловителями;
- обосновать параметры мокрого пенного пылеуловителя с учетом температуры очищаемого загрязненного потока воздуха;
- снизить затраты на приобретение и использование растворов ПАВ с антифризными добавками за счет осветления с применением гидроциклонов;
- обеспечить концентрацию пыли при бурении разведочно-эксплуатационных скважин до санитарных норм в условиях отрицательных температур;
- дополнить знания студентов по пылеподавлению в процессе бурения скважин и шпуров при чтении курсов по «Технологии проходки горизонтальных горно-разведочных выработок» и «Технологии проходки горно-разведочных выработок неглубокого заложения».

**Апробация работы.** Основные положения работы и отдельные этапы диссертации доложены и обсуждены на научно-практической конференции «Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития городов и промышленных комплексов г. Москвы», на У1 международной научно-практической конференции «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений п.и.», проводимых в РГГРУ в 2008-2010 г. По теме диссертации опубликовано пять работ, в том числе три - в изданиях рецензируемых и рекомендованных ВАКом.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений. Содержит 190 страниц машинописного текста, 38 рисунков, 2 таблицы, библиографии из 195 наименований и приложения из 18 таблиц.

Работа выполнена на кафедре горного дела РГГРУ под руководством д.т.н., проф. Л.Г. Грабчака.

Автор выражает благодарность преподавателям и сотрудникам кафедры горного дела за советы и помощь в проведении работы. Автор благодарен научному консультанту д.т.н. Иляхину С.В. за ценные советы и замечания, сделанные при проведении экспериментальных исследований и при выполнении теоретических исследований. Автор признателен сотрудникам отдела по технике безопасности Михайловского ГОКа за выполнение

полигонных исследований по пылеподавлению на карьере при бурении скважин в зимний период.

### **Краткие сведения по изучаемому вопросу.**

Вопросами пылеподавления занималось достаточно большое количество исследователей такие как Андроньева С.М., Бересневич П.В., Бухман Я.З., Радченко Г.А. и др. Опыт использования смачивателей (ПАВ) при пылеподавлении повышает эффективность мокрых средств пылеулавливания, по сравнению с обычными, на 30-40%. Фундаментальные исследования по применению мокрых методов пылеулавливания (и с применением ПАВ) были проведены Ребиндером П.А., Таубманом А.В., Никитиной Н.А., Кириным Б.Ф., Школьниковой Р.И., Кудряшовым В.В., Ужовым В.Н., Саранчук В.И., Межлумовым А.О., Тарат Э.Я., Мухленовым И.П.

Отдельные работы Михеева И.Г., Гарбуз В.А., Маликова Ю.И., Егорова В.С, Еремеева В.И. были посвящены вопросам пылеподавления при бурении взрывных скважин разного диаметра на карьерах Советского Союза при положительных температурах (от +3-5°С до +50°С) с использованием тканевых фильтров, электрофильтров, методов гидрообеспыливания и поэтому часто осуществлялся прямой перенос этих разработок и методов пылеподавления на условия при отрицательных температурах приводило, как правило, к отрицательным результатам.

В ЗабНИИ доказали, эффективность применения воды на основе хлористого натрия в условиях умеренных отрицательных температур, что подтверждается также исследованиями Ароновой Г.В и Гагуза Ф.Г., Воронова Е.Т. Исследованиями Кудряшова Б.Б, Яковлева А.М, Кирсанова А.И., Межлумова А.О. разработана технология бурения разведочно-эксплуатационных скважин с продувкой забоя воздухом в условиях отрицательных температур, включая многолетнемерзлые горные породы с учетом распределения температуры г.п. по глубине (на основании данных Дьконова Д.И.). Однако вопросы пылеподавления недостаточно изучены.

По целям и содержанию исследования особенностей ведения горно-разведочных работ в условиях криолитозоны можно разделить на две группы: влияния одного-двух специфических факторов (Кудряшов В.В., Ужов В.Н., Шувалов Ю.В., Гендлер С.Г., Чемезов Е.Н, Чабан П.Д.и др.) и особенностей многолетней мерзлоты (Бакакин В.П., Дядькин Ю.Д., Скуба В.Н., Зильберборд А.Ф., Воронов Е.Т., Шерстов В.А., Брылов С.А., Таранов А.Т. и др.). Применявшиеся методы гидрообеспыливания с использованием антифризов и ПАВ, рекомендованные вышеуказанными авторами, а также работы ИПКОН-48, ВНИИ-1, ИГД Севера имеют ограниченное использование из-за вторичного смерзания разрушенной горной породы в забое, образования наледи в подошве горной выработки и ускоренных сроков амортизации (из-за добавления NaCl в воду) применяющегося бурового оборудования имеют.

Существующие способы пылеулавливания при бурении в условиях отрицательных температур не обеспечивают требуемый уровень ПДК по пыли, особенно для тонкодисперсных фракций. Из анализа данных приведенного обзора по пылеподавлению при бурении разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров с пылеотсосом в условиях отрицательных температур можно сделать вывод о возможной эффективности гидрообеспыливания, по сравнению с другими методами, но на основе растворов с антифризными добавками и смачивателями и с использованием мокрых пенных пылеуловителей, применение которых на практике требует проведения дополнительных исследований.

**Основные защищаемые положения.** Обобщение теоретических данных по изучаемому вопросу позволяет сформулировать следующие защищаемые положения.

***1. Граничные условия погружения частицы в пылеулавливающий реагент определяются параметрами частиц пыли, раствора и ВМП, скоростью соударения частицы пыли с преградой и температурой взаимодействующих фаз.***

Внедрение твердой частицы в слой жидкости, согласно данным Таранова А.Т. определяется уравнением:

$$W_{\text{п}} = 8/3 (\pi r^2 \sigma_{\text{жг}} \cos \beta) \quad (1)$$

Угол  $\beta$  является углом между направлениями поверхностного натяжения твердого тела  $\sigma_{\text{тг}}$  и жидкости  $\sigma_{\text{жг}}$ , причем с краевым углом  $\theta$  он связан соотношением  $\beta=180-\theta$ . При плохой смачиваемости, когда  $\beta=0$  работа внедрения имеет max значение; при  $\beta=90^\circ$   $W_{\text{п}}=0$ ; а при  $\beta>90^\circ$  возникает сила смачивания способствующая внедрению твердой частицы радиусом  $r$  в слой жидкости, а при  $\beta < 90^\circ$  для внедрения твердой частицы в жидкость достаточно контакта взаимодействующих фаз. Эта формула справедлива тогда, когда происходит смачивание с полной заменой границы раздела "твердое тело-газ" на "твердое тело-жидкость". Для полного внедрения частицы необходима дополнительная кинетическая энергия  $W_{\text{к}}$ , которая должна быть больше  $W_{\text{п}}$ . Если этого условия не соблюдается, то происходит прилипание частицы без проникновения последней в раствор или наблюдается скольжение частицы по поверхности раствора. Изложенное справедливо и для случая, когда диаметр твердой частицы  $d$  меньше толщины пленки жидкости  $\delta$ , т.е.  $d \leq \delta$ .

При диспергировании жидкости до капель, преобладающим в процессе гетерокоагуляции пыли является силы инерции или скорость соударения частиц пыли и капли жидкости.

Приравнивая  $W_{\text{п}}$  к  $W_{\text{к}}$  и зная размер частицы можно определить необходимую скорость соударения или внедрения частицы в поверхность раствора или капельку жидкости и которая составит от 10 до 20 м/с.

В мокром пенном пылеуловителе частицы пыли улавливаются пузырьками ВМП. Существует минимальная и максимальная скорости встречи пылинки и пузырька, которые определяются выражением,;

$$v_{\max} = \sqrt{6 W_3 / \rho_{\text{пн}} R_{\text{п}}}, \text{ м/с} \quad (2)$$

$$v_{\min} = \sqrt{6 W_a / \rho_{\text{пн}} R_{\text{п}}}, \text{ м/с} \quad (3)$$

где  $W_3$  – энергия захвата пылинки пузырьком, Дж/м<sup>2</sup>;  $W_a$  – энергия адгезионного захвата пылинки поверхностью пузырька, Дж/м<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{пн}}$  – плотность пены, кг/м<sup>3</sup>;  $R_{\text{п}}$  – радиус пылинки, м.

При скоростях меньших  $v_{\min}$  пылинки обтекают пузырек, а при скоростях больше  $v_{\max}$  наблюдается механический разрыв пленки пузырька. Если потока равна  $v_{\max}$  в захвате преобладает инерционная составляющая, а когда скорость равна  $v_{\min}$  – адгезионная. Энергия налипания частицы  $W_n$  на каплю или поверхность пузырька оказывается вдвое меньше энергии ее полного захвата:

$$W_n = 1/2 W_3 = \sigma \text{ ж.г.} \cos \theta, \quad (4)$$

Пылеулавливание в пенном пылеуловителе происходит не только элементарным пузырьком, но и слоем пены с минимально возможной высотой  $h_{\min}$  покрывающий раствор. Согласно исследованиям Саранчук В.И. для эффективного захвата слоем пены пылинки должно выполняться условие:

$$\varepsilon_k \leq \varepsilon_{\text{ин}} + n_c W_3, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{ин}}$  – энергия пылинки, движущейся по инерции, Дж;  $n_c = h_{\min} / d_{\text{ср}}$  – максимальное количество слоев пены, пробитых частицей пыли с энергией  $\varepsilon_k$ ;  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр пузырьков пены, м.

В случае когда  $\varepsilon_k = \varepsilon_{\text{ин}}$ , пыль быстро теряет энергию и не улетает в атмосферу. При более жестких условиях, когда  $\varepsilon_k \geq \varepsilon_{\text{ин}}$ , улавливание пыли происходит экранированием пузырьками пены. Эффективный захват отвечает условию:

$$\varepsilon_k \leq (n_c W_3) \quad (6)$$

Пылинка может разрушать пузырьки пены и чем глубже погрузится в слой, тем более вероятным будет ее улавливание. Связь между минимальной высотой столба пены и максимальной скоростью встречи пылинки определяется выражением:

$$v_{\max} = \sqrt{(-12 h_{\min} / d_{\text{ср}}) (\sigma \text{ ж.г.} \cos \theta / R_{\text{п}} \rho_{\text{пн}})}, \text{ м/с} \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{пн}}$  – плотность пены, кг/м<sup>3</sup>,  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр пузырька ВМП, м.

Максимальная скорость пылинки составит 5-7 м/с.

При подставлении в вышепредставленные формулы значений параметров растворов и пыли, установлено, что скорость частиц пыли для внедрения в поверхность или капли раствора должна быть как можно больше, а для внедрения в отдельный пузырек или слой ВМП (с высотой не менее 0,004 м)  $v_{\min}$  составит 0,25 м/с, а  $v_{\max}$  – 2,5 м/с.

При пылеподавлении предлагаемым нами способом необходимо увеличивать слой пены, понижать ее дисперсность, понижать поверхностное натяжение жидкости, пенообразующий раствор должен как можно сильнее смачивать улавливаемую пыль, скорость частиц нужно повышать, тогда механизм пылеподавления будет инерционно-адгезионным и чем выше скорость частиц и их энергия, тем выше будет коэффициент



пылеулавливания для тонко дисперсной фракции. Наибольшее улавливание характерно для гидрофильной пыли.

Для подбора оптимального режима пылеулавливания необходимо знать температуру входящего и отходящего из скважины очистного агента. Задача температурного режима бурящейся скважины по заключению Кудряшова Б.Б. весьма сложна и точное ее решение вызывает значительные трудности. В процессе бурения вначале перебурируется слой *постоянной суточной температуры*, залегающий на глубине не превышающей 1-2 м от земной поверхности, за которым слоем следует слой постоянной годовой температуры, называемый *нейтральным* слоем и ниже него температура г.п. увеличивается с глубиной. Температура на глубине нейтрального слоя  $t_{н.с.}$  может быть принята равной среднегодовой температуре земной поверхности,  $t_{с.г.}$ . Изменение температуры с глубиной в условиях достаточной однородности разреза подчиняется линейному закону (по Дьяконову Д.И.):

$$t = t_{н.с.} + \Gamma H, \text{ град.} \quad (8)$$

где  $H$  – глубина, отсчитанная от нейтрального слоя, м;  $\Gamma$  – геотермический градиент,  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$  ( $0,66 \div 10^{\circ}\text{C}/100\text{м}$ ).

Т.к. для большинства карьеров и рудников вне пределов вечной мерзлоты температура г.п. на глубине ниже слоя промерзания положительная, интерес, с точки зрения определения температуры отходящего из скважины при бурении воздуха, представляет распределение температуры в скважинах пробуренных в мерзлых породах. Применительно к условиям колонкового разведочного бурения в мерзлых породах с очисткой забоя воздухом авторами Кудряшовым Б.Б. и Яковлевым А.М. получены формулы для распределения температуры по стволу скважины. С учетом температуры нагнетаемого в скважину воздуха  $t_{1н}$ , температуры г.п.  $T_{п}$ , температура очистного агента на устье скважины  $t_y$  при колонковом бурении определяется по формуле:

$$t_y = (T_{п} - t_{1н}) r_2/r_1 + T_{п} \quad (9)$$

где  $t_{1н}$  - начальная температура нагнетаемого в скважину воздуха,  $r_2$  и  $r_1$  - корни уравнения.

При бурении неустойчивых вечномерзлых горных пород для сохранения ствола скважины необходимо понижать температуру исходного очистного агента до температуры г.п. или ниже и величина этой температуры определяется из выражения:

$$t_{\underline{}} = t - [k F (t_b - t_n) / G \cdot C_p], \text{ } ^{\circ}\text{C}, \quad (10)$$

где  $t_{\underline{}}$  - температура охлажденного воздуха на выходе из охладителя,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k$  – коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха  $t_n$  к внутреннему  $t_b$ ;  $F$  – площадь теплообменника,  $\text{м}^2$ ;  $G$  – масса воздуха,  $\text{кг}$ ;  $t$  – температура сжатого воздуха на входе в охладитель,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_p$  – удельная теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ . По данным практики величина  $t_{\underline{}}$  должна быть не менее  $-(1-15)^{\circ}\text{C}$ . Дополнительно, для определения температуры воздуха, подаваемого в пылеуловитель, необходимо учесть подсос наружного воздуха

в осадительную камеру и температуру поверхности пылеулавливающих устройств.

Пылеулавливающая способность жидкостей напрямую связана с их поверхностным натяжением. Поверхностное натяжение индивидуальных веществ на границе с газом (воздухом) снижается с повышением температуры, тогда для большинства неполярных жидкостей эта зависимость в первом приближении может быть аппроксимирована соотношением:

$$\sigma_{\text{ж}} = \sigma_{\text{ж}}^0 - a \Delta T, \text{ откуда } a = - \frac{d\sigma_{\text{ж}}}{dT} \quad (11)$$

где  $\sigma_{\text{ж}}$  – поверхностное натяжение при данной температуре;  $\sigma_{\text{ж}}^0$  – поверхностное натяжение при стандартной температуре;  $\Delta T$  – разность между данной и стандартной температурами;  $a$  – постоянная, равная температурному коэффициенту поверхностного натяжения с обратным знаком.

В свою очередь Сагден М. [120] предложил уравнение, в котором зависимость поверхностного натяжения от температуры компенсируется изменением плотности вещества.

$$\sigma_{\text{ж}} = (P \Delta \rho / M)^{-1}, \quad (12)$$

где  $P$  – величина, названная автором парахором (не зависит практически от температуры);  $\Delta \rho$  – разность между плотностями жидкости и пара;  $M$  – молекулярная масса жидкости.

Для правильного подбора ПАВ, помимо температуры, необходимо знать зависимости поверхностного натяжения на границе жидкость-газ  $\sigma$  от концентрации пенообразователя  $C$  в растворе, которая выражается известным уравнением Шишковского:

$$\sigma = \sigma_{\text{ж}}^0 - b \ln(1 + AC), \quad (13)$$

здесь  $b$  и  $A$  – постоянные, причем  $b$  постоянна для всего гомологического ряда, тогда как константа  $A$  возрастает в 3-3,5 раза при переходе к каждому последующему гомологу;  $\sigma_{\text{ж}}^0$  – поверхностное натяжение чистого растворителя.

Как правило, увеличение концентрации ПО выше 0,2-0,5 % (для водных растворов) не вызывает дополнительного снижения поверхностного натяжения раствора. Анализ вышеприведенных уравнений позволяет сделать заключение об уменьшении поверхностного натяжения жидкости при увеличении концентрации ПАВ в растворе и повышении температуры. Пользуясь вышеприведенными формулами можно рассчитать температуру промывочного агента по воздушному тракту от компрессора до пылеуловителя, которая учитывается при оценке её влияния на эффективность пылеулавливания в мокром пенном пылеуловителе. Зная влияние температуры раствора и содержащегося в нем ПАВ на поверхностное натяжение можно подбирать величину вышеуказанных параметров для обеспечения эффективного пылеулавливания при бурении. Замеры температуры в скважинах в природных условиях в зимний период производился на Михайловском ГОКе.

В соответствии с выше представленными уравнениями были определены основные параметры пылеулавливающего раствора (концентрация ПО и антифриза), температура газового потока, скорости соударения частиц пыли с поверхностью раствора, каплями жидкости, пузырьками и слоем ВМП, что позволило спроектировать и изготовить полноразмерный полигонный образец пенного мокрого пылеуловителя.

**2. В мокрых пенных пылеуловителях осаждение пыли определяется механизмами пылеулавливания, физико-химическими свойствами улавливающего раствора, ВМП и пыли, концентрацией ПАВ и температурой процесса пылеулавливания.**

Обычно улавливание пылевых частиц осуществляется в пылеуловителях под воздействием не одного, а нескольких механизмов осаждения одновременно, т.к. ни один из них в отдельности не обеспечивает требуемую очистку. В предлагаемой конструкции мокрого пенного пылеуловителя используются следующие механизмы: гравитационное осаждение (для крупных частиц); инерционное; касания (зацепления); осаждение под действием центробежной силы; диффузии. Чем больше механизмов пылеулавливания задействовано в пылеуловителе, тем выше его эффективность. Общую эффективность улавливания  $\eta'$  можно описать уравнением:

$$\eta' = 1 - (1 - \eta'_G)(1 - \eta'_{sk})(1 - \eta'_R)(1 - \eta'_D)(1 - \eta'_{\omega}), \% \quad (14)$$

где  $\eta'_G$  – эффективность седиментационного осаждения,  $\eta'_{sk}$  – коэффициент осаждения,  $\eta'_R$  – эффективность зацепления,  $\eta'_D$  – эффективность диффузионного осаждения,  $\eta'_{\omega}$  – эффективность центробежного пылеулавливания.

В мокрых пенных пылеуловителях помимо механизмов осаждения на эффективность пылеподавления влияют физико-химические свойства растворов, ВМП и пыли. В процессе проведения лабораторных экспериментов исследовались растворы ПАВ на основе ПО-1, КЧНР, Неолас с концентрацией от 0,5% до 4%, а в качестве антифризных добавок применялись этиленгликоль и полигликоль с концентрацией от 10% до 50%, введение которых не вызывало коагуляции ПО.

Установлено, что кратность пены изменяется от 2 до 8 (рис.1.), причем увеличение кратности заметно лишь вначале при концентрации ПАВ до 2% и зависит от типа ПО. Кратность пены водного раствора на 10-20% выше, чем растворов, содержащих антифризные добавки, в то время как стойкость пены растет с увеличением концентрации антифризных добавок (с 10 до 30 %) в среднем на 40-50%.

Характер изменения поверхностного натяжения пенообразующих растворов в зависимости от концентрации ПО и антифризных добавок представлен на рис. 2., из анализа которых следует, что увеличение концентрации пенообразователя (КЧНР, ПО-1) с 1% до 4% вызывает лишь незначительное уменьшение поверхностного натяжения растворов (рис. 2.), а увеличение концентрации в растворе этиленгликоля (с 10% до 30%, при 4%

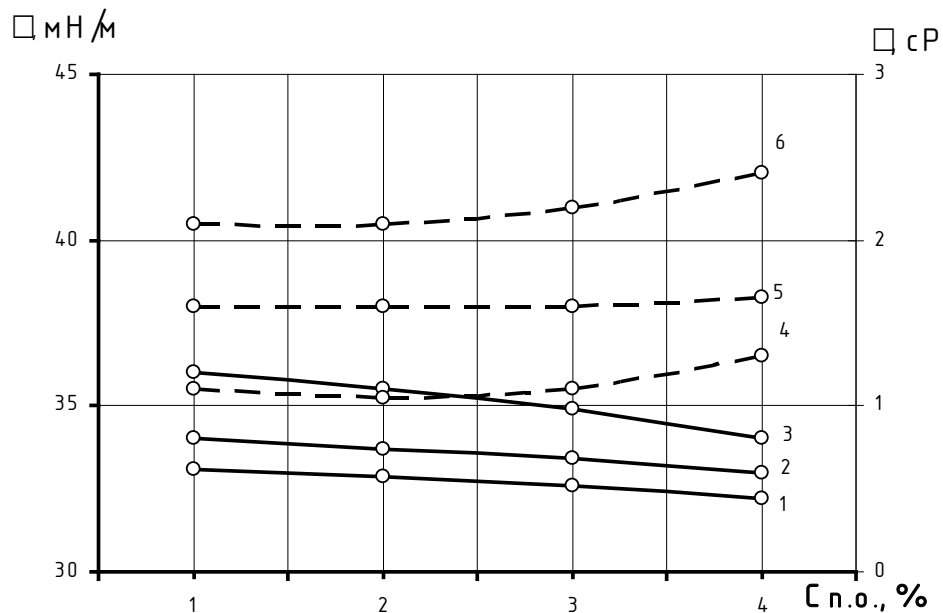


Рис.1.Зависимость кратности (К) и стойкости ВМП (τ) от концентрации ПО (КЧНР):

кратность- 1-водный раствор, 2- 10% ЭГ, 3-30% ЭГ;  
 стойкость- 4- водный раствор, 5- 10% ПГ, 6- 30% ПГ.

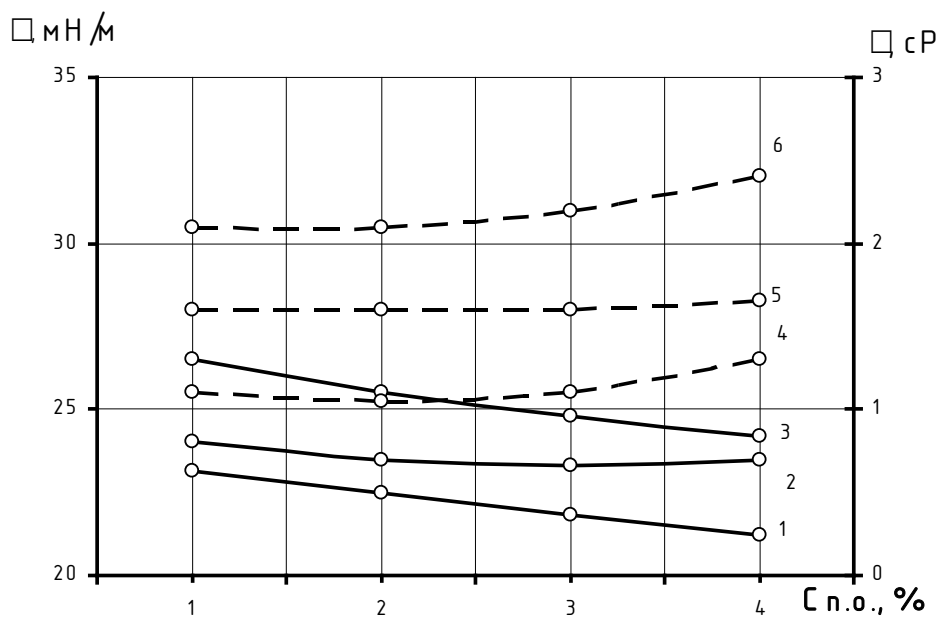


Рис.2.Изменение поверхностного натяжения (σ) и вязкости (η) пенообразующих растворов от концентрации ПО (Cpo) и типа антифриза

σ - 1- водный раствор, 2- 10% ЭГ, 3- 30%ЭГ;  
 η - 4- водный раствор, 5- 10% ПГ, 6- 30% ПГ.

КЧНР) повышает поверхностное натяжение раствора с 28 мН/м до 32 мН/м, что объясняется повышенной величиной поверхностного натяжения антифриза по сравнению с водой.

Влияние концентрации ПО на величину поверхностного натяжения раствора выражается известным уравнением Гиббса и Шишковского, в которое необходимо вносить поправку на содержание в растворе антифриза либо через плотность раствора, либо вязкость. Проведенными нами лабораторными экспериментами подтверждено, что плотность раствора ПАВ с антифризными добавками определяется концентрацией последних и приближается к их плотности, а вязкость пенообразующих растворов определяется концентрацией и вязкостью антифризных добавок (рис.2.). Причем ни плотность, ни вязкость раствора практически не зависит от концентрации в последнем ПАВ. В условиях отрицательных температур важной характеристикой пены является точка замерзания пенообразующих растворов. Лабораторными экспериментами с растворами ПАВ на основе полигликоля установлено, что для зоны Урала и Сибири в зимних условиях наиболее приемлемым является раствор с 40% концентрацией полигликоля или этиленгликоля. При этом понижение температуры раствора скажется на увеличении его вязкости и, как следствие, повышении поверхностного натяжения. Но в большей степени поверхностное натяжение пылеулавливающих растворов (и ВМП) на основе ПАВ с антифризными добавками зависит от температуры раствора, что подтверждается данными, представленными на рис. 3.

С уменьшением температуры раствора от +4°C до -14°C поверхностное натяжение увеличивается с 52 мН/м до 67 мН/м, т. е. увеличение достигает почти 25 %, что согласуется с уравнением Гиббса-Гельмгольца. Кроме этого, нами получены зависимости, устанавливающие температуру пены от температуры пылеулавливающей жидкости (рис.4.). При положительных и отрицательных значениях температуры воздуха температура пены определяется, в основном, температурой пылеулавливающей жидкости (рис. 4.). Т.о. для того, чтобы обеспечить положительную температуру пузырьков ВМП (с учетом температуры отходящего из скважины потока загрязненного воздуха до -15°C) достаточно поддерживать температуру пылеулавливающей жидкости на уровне +10°C ÷ +12 °C (кривая 2, рис. 4.) и при этом исключается подмерзание пены в баке отстойнике.

В пенном аппарате практически полностью улавливаются любые пыли, размеры частиц которых превышают 20—30 мкм, а пыль более мелких фракций улавливается в различной степени в зависимости от дисперсности, плотности и смачиваемости частиц, при этом наибольшее влияние оказывает дисперсность пыли. На рис. 5. представлены результаты исследований по определению запыленности воздуха на выходе из пенофильтра в зависимости от типа и концентрации пенообразователя (КЧНР) в растворе при изменении концентрации пыли на входе, составлявшей 25; 50; 100; 125 г/мин (соответственно, кривые 1,2,3,4).

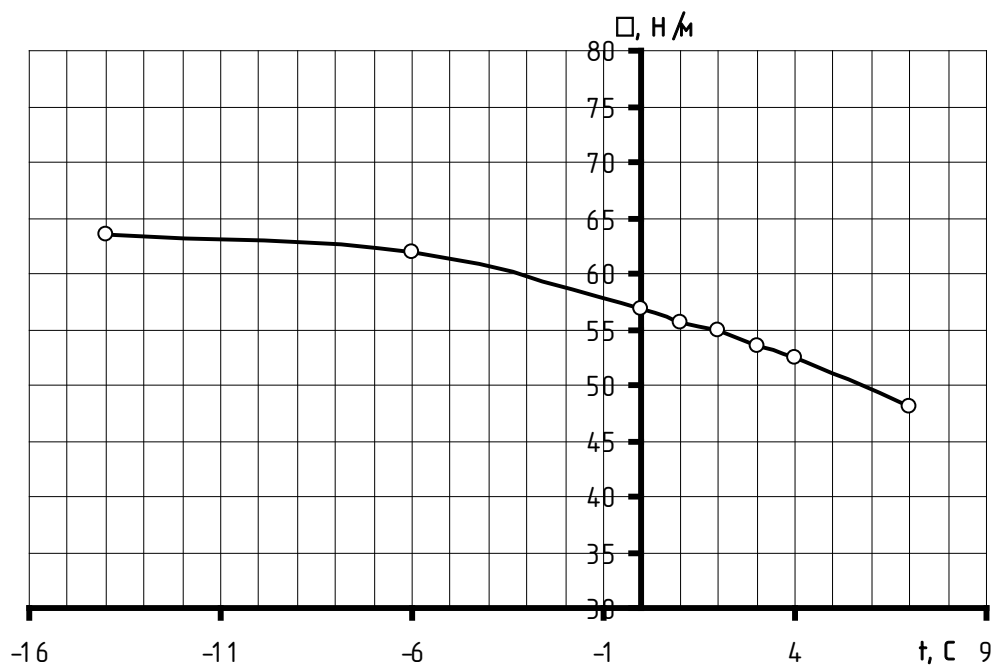


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) 20% раствора NaCl с содержанием 1% ПО “Неолас” от его температуры.

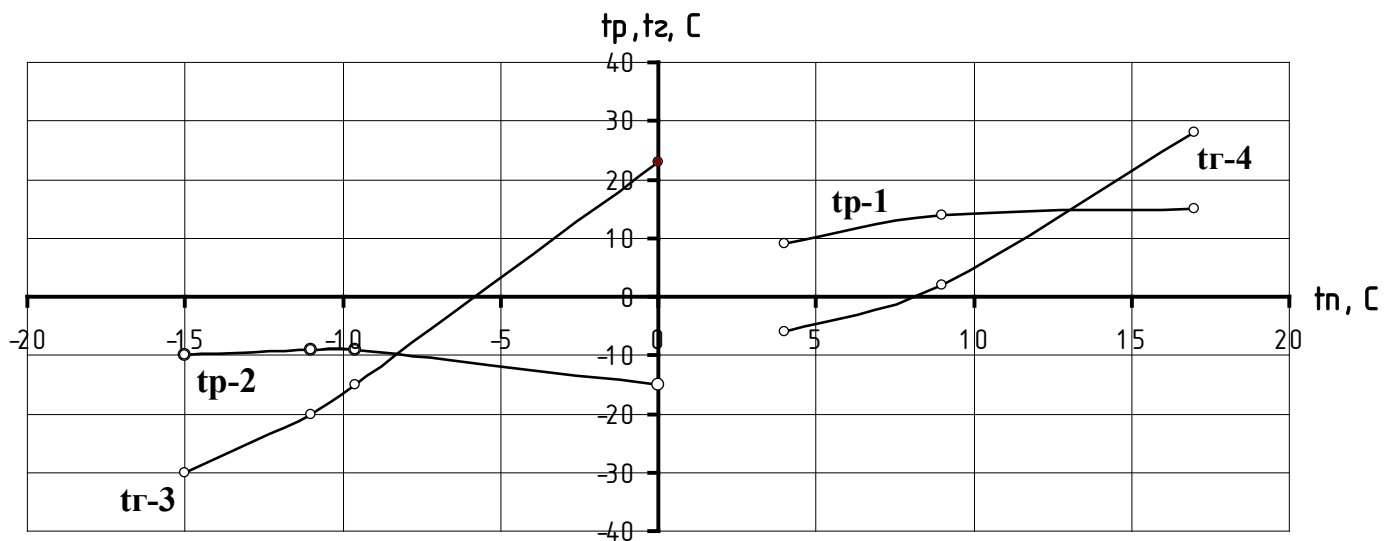


Рис. 4. Изменение температуры ВМП ( $t_n$ ) от температуры газа ( $t_r$ ) и раствора ( $t_p$ ).

Увеличение начальной запыленности с 25 до 150 г/мин вызывает при всех типах пенообразователя увеличение запыленности на выходе с 20 до 100 мг/м<sup>3</sup> (при концентрации пенообразователя до 1 %), а увеличение концентрации пенообразователя до 4 % снижает запыленность на выходе почти в 2 раза. Коэффициент пылеулавливания изменялся от 60 до 90% (такие высокие значения запыленности объясняются быстрым загрязнением раствора уловленной пылью).

Вышеизложенное доказывает, что использование мокрых пенных пылеуловителей на практике позволит решить проблему запыленности при бурении.

**3. Разработанная технология пылеподавления на основе растворов ПАВ с антифризными добавками при бурении разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров в условиях отрицательных температур окружающей среды (до -40°C) и массива г.п. (до -15°C) обеспечивает снижение запыленности на выходе из установки до санитарных норм на открытых и подземных горных работах.**

В процессе стендовых испытаний опытного образца пенного пылеуловителя (рис.6.) было опробовано четыре схемы пылеулавливания (рис. 7.), для которых коэффициент пылеулавливания для новосмоленской тонкодисперсной гранитной пыли (<6 мкм) составил от 85% до 98%. С учетом результатов испытаний 4-х схем рекомендована для внедрения в производство пятая, для которой коэффициент пылеулавливания достигал 99,8 %, т.е. обеспечивал санитарные нормы пыли на выходе из устройства.

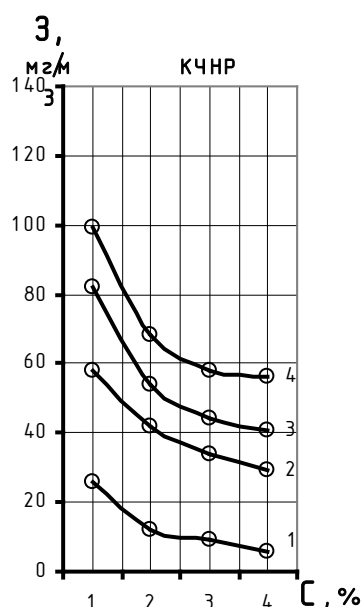


Рис. 5. Изменение запыленности (З) на выходе из пенофильтра в зависимости от концентрации ПО (С) и пыли на входе (З).

При определении влияния физико-химических свойств раствора на коэффициент пылеулавливания в установку заливался раствор пенообразователя с концентрацией ПАВ (КЧНР) от 0,2 до 4% и концентрацией антифризных добавок (полигликоль) от 5 до 40%.

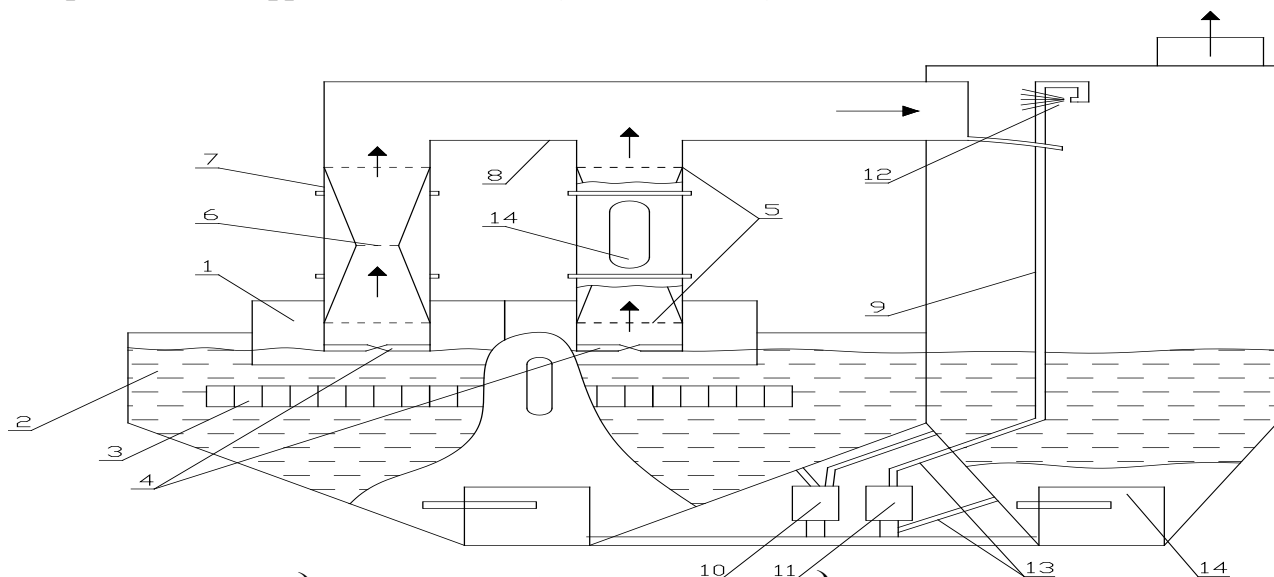


Рис. 6. Схема полноразмерного стенда для проведения испытаний пенного мокрого пылеуловителя

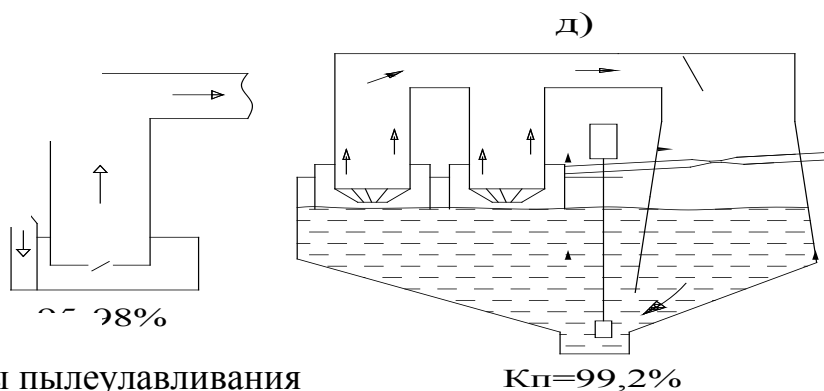
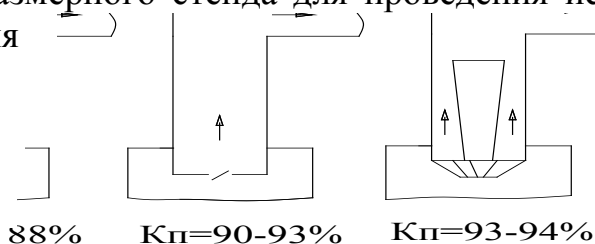


Рис. 7. Схемы пылеулавливания

Для хорошо смачиваемой пыли (коркинская сланцевая тонкодисперсная пыль) коэффициент улавливания плавно снижается от 98 % при 0,2 % ПО до 95% при 0,4 % ПО (рис. 8 и 9.). Дальнейшее увеличение концентрации ПО в растворе до 0,8% не приводит к изменению эффективности пылеулавливания, что объясняется понижением скорости массообмена между жидкостью и частицами пыли при увеличении концентрации ПАВ. Оптимальная концентрация пенообразователя в летний период рекомендуется 0,4-0,6%, а в зимний - до 1,0 % при температуре  $t^{\circ}=-25^{\circ}\text{C}$  из-за возможного подмерзания пены.



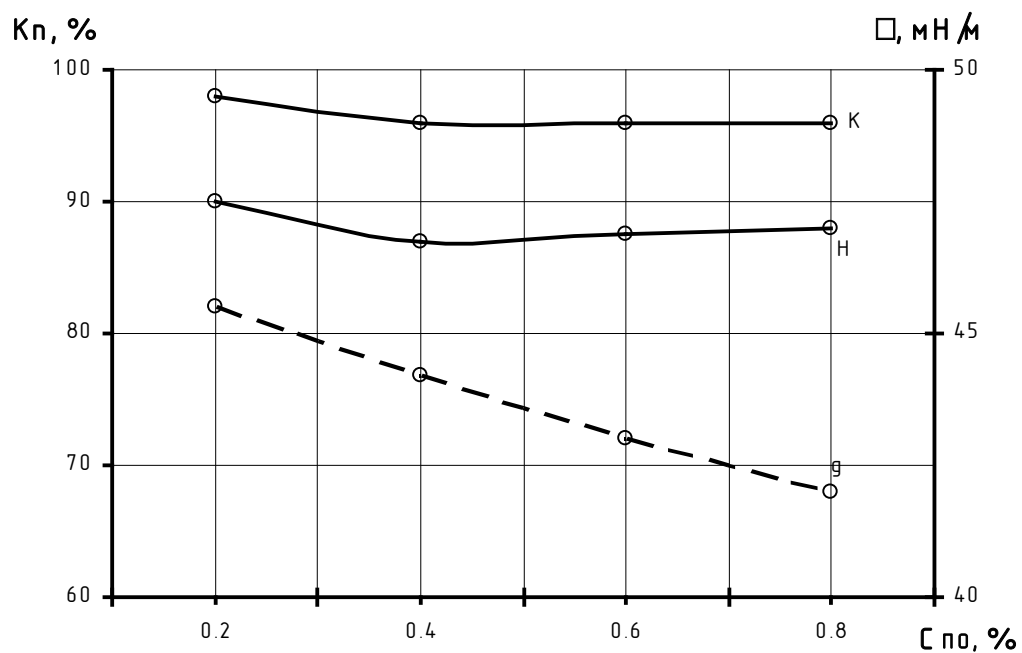


Рис. 8. Влияние концентрации ПО ( $C_{\text{по}}$ ) на коэффициент пылеулавливания установки ( $K_{\text{п}}$ ), где  $\sigma$ - поверхностное натяжение раствора.

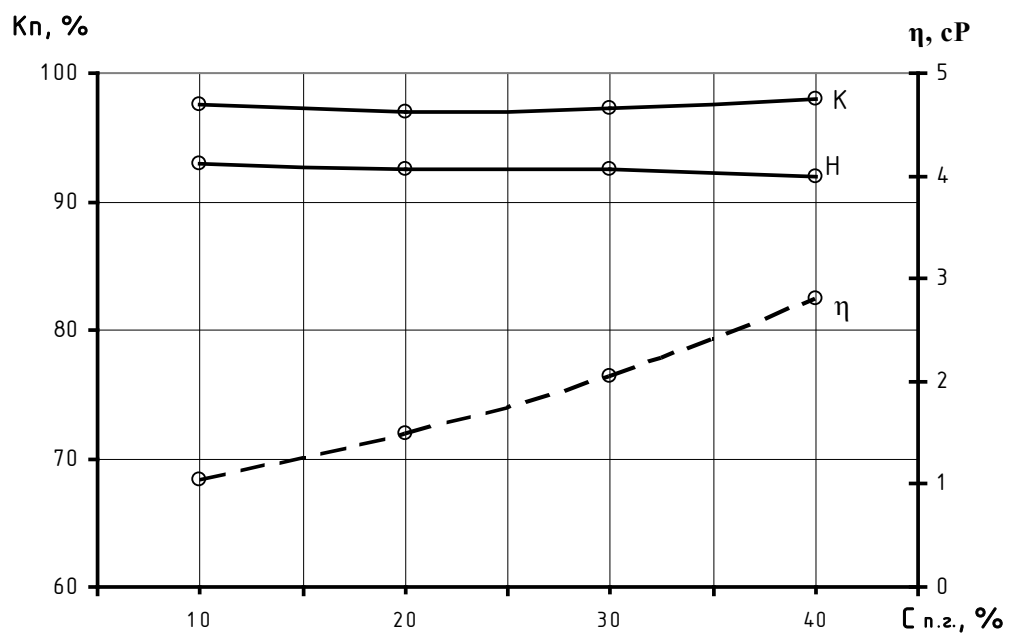


Рис. 9. Влияние концентрации антифриза ( $C_{\text{пг}}$ ) на коэффициент пылеулавливания установки ( $K_{\text{п}}$ ), где  $\eta$  – вязкость раствора.

При увеличении концентрации полигликоля в растворе с 10 до 40 % коэффициент пылеулавливания незначительно снижается. Концентрация полигликоля в растворе определяется температурой окружающей среды. В установках циклонного типа эффективность пылеулавливания определяется скоростью массообмена между жидкостью и частицами пыли.

Помимо этого, при температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  величина поверхностного натяжения раствора, по сравнению с положительными температурами, например, при  $+(5-10)^{\circ}\text{C}$ , увеличивается почти на 60% (рис. 3.), что снижает коэффициент пылеулавливания установки. Поэтому, для его повышения рекомендуется поддерживать температуру пылеулавливающего раствора положительной. Кроме этого, установлено (рис. 10.), что чем выше фракционный состав пыли одного в того же химического состава, тем выше коэффициент пылеулавливания. Причем плохо смачиваемая тонкодисперсная гранитная пыль «н» улавливается хуже и значения коэффициента пылеподавления существенно ниже, 82-94%. При изменении нагрузки пыли на входе в пылеуловитель от 100 до 900 г/мин изменение коэффициента пылеулавливания не превышает 4,5%, что подтверждает результаты лабораторных исследований.

Однако по мере работы пенного пылеуловителя пылеулавливающий раствор будет насыщаться уловленной пылью и эффективность пылеулавливания будет снижаться (при концентрации пыли в растворе более 200 мг/л), поэтому в устройстве предусмотрена очистка и удаление из раствора уловленной пыли с использованием гидроциклонов.

Анализ результатов испытаний различных конструкций завихрителя показал, что завихритель «чашечного» типа, по сравнению с лопастным, обеспечивает создание более равномерного поля скоростей (до 5- 7 м/с) и коэффициент пылеподавления установки с завихрителем чашечного типа для новосмоленской тонкодисперсной пыли составил 93,7 %, а с лопастным – 88,5 %. Оптимальный уровень раствора для завихрителя чашечного типа 70-110 мм, при этом коэффициент пылеулавливания тонкодисперсной пыли достигает своей максимальной величины и общее сопротивление не превышает 150-160 мм водн. ст. Одновременно отмечено, что при приближении уровня зазора к оптимальной величине брызгоунос снижается до 70-100 мг/м<sup>3</sup>, а при использовании ПАВ – до 20 мг/м<sup>3</sup>, т.к. образующаяся ВМП играет роль своеобразного брызгоуловителя.

Гашение пены в баке отстойнике рекомендуется осуществлять отбойником, установленным в баке-отстойнике и эжектором в комплекте с трубой Вентури (реализованы в схеме «д» рис. 7.). При подходе загрязненного потока воздуха после циклона к пылеуловителю через эжекторное устройство в подающем воздуховоде образуются тонкодисперсные капли раствора ПАВ и остатки пленки пузырьков (после разрушения), которые взаимодействуют с частицами пыли. Такая схема подачи потока воздуха из скважины способствует дополнительному пылеулавливанию при входе загрязненного потока воздуха в улитку и возврату ПО на поверхность раствора в емкости пылеуловителя.

Кроме этого отмечено, что основное пылеулавливание происходит не в вертикальной колонне с пенообразующими сетками, а на входе в улитку, в улитке и при выходе потока очищаемого воздуха в вертикальную колонну.

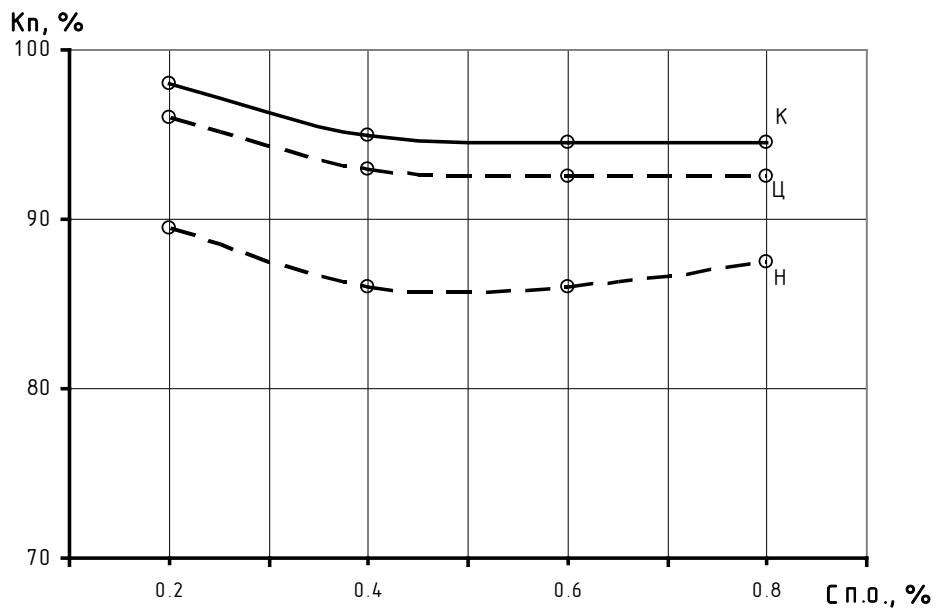


Рис. 10. Зависимость влияния фракционного состава пыли на коэффициент пылеулавливания установки, где пыль:  
 К- коркинская тонкодисперсная (<10мк),  
 Ц- новосмоленская циклонная (>60мк),  
 Н- новосмоленская тонкодисперсная (<6мк).

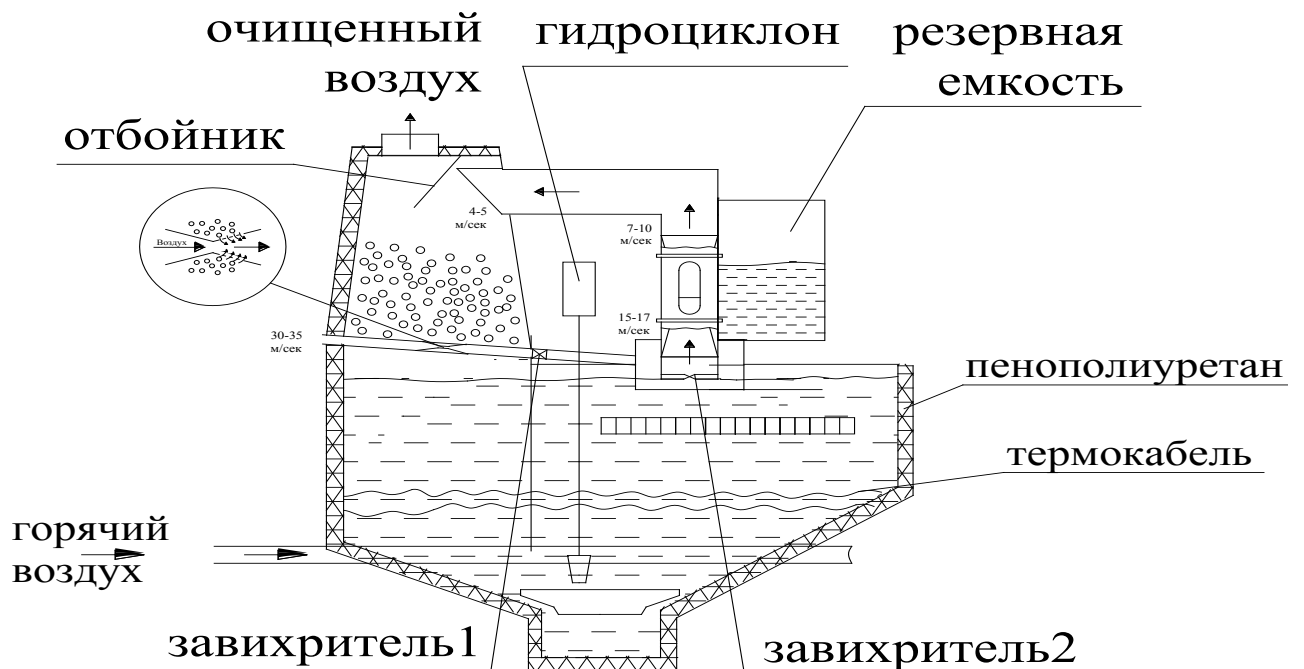


Рис. 11. Схема рекомендуемой конструкции мокрого пенного пылеуловителя.

Дополнительные сетки в вертикальной колонне снижают тангенциальную скорость потока в вертикальной колонне пылеуловителя и не способствует повышению пылеулавливания, а при отрицательных температурах - подмерзают и их целесообразно удалить.

Для пылеподавления при бурении разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров в условиях отрицательных температур рекомендуется использование мокрого пенного пылеуловителя по 3-х ступенчатой схеме очистки: пылесадительная камера–циклон-мокрый пенный пылеуловитель. Продувку скважин от шлама рекомендуется осуществлять воздухом от компрессора при давлении 0,5-2 МПа. Температура загрязненного потока воздуха из скважины может иметь значения от +20°С до – 20°С, а скорость воздушного потока не ниже 12-15 м/с и объемом до 60-70 м<sup>3</sup>/мин. Величина разрежения в устье скважины должна быть в пределах 35—50 мм вод. ст., а во избежание отложений шлама в соединительной линии между осадительной камерой и циклоном скорость воздушного потока в ней должна превышать скорость восходящего потока в кольцевом пространстве, т.е. быть больше 12-15 м/с. После вентилятора, установленного за циклоном, воздушный поток, частично освобожденный от крупнодисперсных и мелких фракций пыли, направляется в мокрый пенный пылеуловитель где и подвергается нескольким стадиям очистки.

Загрязненный воздушный поток после циклона направляется в бак отстойник ВМП (рис. 11.) и через многоступенчатый эжектор или эжектор, соединенный с трубой Вентури, проходит со скоростью не менее 30 м/с, захватывая ВМП и разрушая ее. За счет столкновения частиц пыли с каплями вытекающего из пузырьков раствора ПАВ, пленками разрушаемых пузырьков ВМП и каплями, образуемыми при разрушении пузырьков ВМП (от 3-5 мкм до 100 мкм) происходит первичное мокрое улавливание крупно- и мелкодисперсной пыли размером 10÷50 мкм. Причем за счет использования подачи загрязненного воздуха через эжектор с захватом пены в баке отстойнике происходит возврат ПАВ из бака отстойника в емкость пылеуловителя, что способствует увеличению концентрации ПАВ в растворе в подулиточном пространстве.

Затем воздух перед подачей в улитку закручивается первым завихрителем чашечного типа (по часовой стрелке) и контактирует с раствором ПАВ на вертикальных стенках улитки (за счет их смачивания каплями раствора ПАВ от разрушения пленок ВМП), где осаждаются частицы размером от 5÷10 мкм до 30÷50 мкм. Кроме этого, загрязненный воздушный поток в улитке с тангенциальным ускорением в двух плоскостях контактирует с поверхностью пылеулавливающего раствора со скоростью до 20 м/с и тонкодисперсная пыль (2-5 мкм) с оставшимися в потоке мелкодисперсными частицами, улавливаются раствором и слоем пены на поверхности раствора.

После этого поток воздуха под углом до 90° через зазор 70—110 мм между плоскостью раствора в улитке и основанием второго завихрителя чашечного типа, попадает в отводную вертикальную колонну, в которой за счет столкновения частиц пыли со скоростью от 2 до 7 м/с с пузырьками ВМП и

каплями раствора ПАВ, а также контакта с увлажненными стенками вертикальной колонны, оставшаяся пыль улавливается (подобная схема рекомендуется при температуре очищаемого загрязненного потока воздуха от  $-20^{\circ}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ ).

После выхода образовавшегося потока пены и воздуха с уловленными частицами в бак-отстойник потоки сталкиваются с отбойником (каплеуловителем, рис. 11.), способствуя каплеулавливанию захваченного раствора ПАВ. Общая величина брызгоуноса не превышает  $10\text{-}20\text{ мг/м}^3$ , а для его дополнительного снижения канал для выхода очищенного потока воздуха из бака отстойника выполняется фигурным. Для восполнения каплеуноса установка снабжена автоматическим регулировочным клапаном, который поддерживает заданный уровень раствора ПАВ в установке ( $70\text{-}110\text{ мм}$ ) за счет пополнения свежим раствором из запасной резервной емкости (рис. 11.). При недостаточной степени пылеулавливания, особенно для несмачиваемых частиц пыли, поток воздуха из отходящей вертикальной колонны вместе с потоком образующейся пены направляют вторично на вход второй улитки, (рис. 7- д).

Для обеспечения пылеулавливающих свойств раствора постоянными в течение смены осуществляется его рециркуляция путем установки гидроциклона роторного типа диаметром  $20\text{-}50\text{ мм}$  (с внешним приводом и производительностью не менее  $12\text{-}24\text{ м}^3/\text{час}$ ) - для удаления из раствора уловленных частиц пыли размером от  $1\text{-}2\text{ мкм}$  до  $50\text{-}100\text{ мкм}$ . Уловленная гидроциклоном пыль разгружается в нижнюю часть емкости пылеуловителя (в месте нахождения накопительной емкости для уловленной пыли), из которой собранный буровой шлам удаляется известным способом. За счет этого максимально снижается расход воды, антифриза и пенообразователя.

С целью повышения эффективности пылеулавливания устройства за счет обеспечения минимального поверхностного натяжения раствора и ВМП в емкости пылеуловителя последний теплоизолируется, например, пенополиуританом, а при необходимости раствор ПАВ подогревается до температуры  $+(10\div 12)^{\circ}\text{C}$  за счет собственных источников тепла на буровом станке (при помощи термокабеля, либо теплом от конденсатора компрессора, ЭД, от дизель-генератора). В результате при подаче в пылеуловитель загрязненного потока воздуха из скважины при температуре от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$  последний, при контакте с раствором ПАВ при температуре  $+(10\text{-}12)^{\circ}\text{C}$ , формирует ВМП с положительной температурой, что способствует снижению поверхностного натяжения пленок пузырьков и увеличивает эффективность пылеулавливания как раствором ПАВ, так и воздушно-механической пеной.

При пылеподавлении пенным пылеуловителем при отрицательных температурах отходящего потока воздуха из скважины с температурой от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  и температуре окружающей среды до  $-40^{\circ}\text{C}$  в раствор ПАВ добавляются антифризные добавки, например, полигликоль с концентрацией от  $10$  до  $50\%$ . В качестве ПАВ рекомендуется применение недорогих КЧНР, Неолас, Эльфор с концентрацией в растворе от  $0,2$  до  $1,0\%$  и допущенных

Ростехнадзором России. КПД пенного мокрого пылеуловителя в зависимости от условий пылеулавливания, качественного и фракционного состава пыли достигает 98 % - 99,8 % и гарантированно очищает воздух, отходящий при бурении из скважины, от тонкодисперсной пыли до ПДК.

На открытых горных работах пылеуловитель с циклоном навешивается на станок, а на подземных горных работах – устанавливается на специальной платформе на рельсовом ходу вблизи бурового станка или бурового оборудования.

В целом стендовые испытания полноразмерного образца мокрого пенного пылеуловителя в условиях низких температур доказали возможность реализации идеи комплексного пылеулавливания в одном устройстве и его надежную работу в течение смены при  $t^{\circ}=-40^{\circ}\text{C}$  и концентрации ПГ в растворе от 10 до 40%, концентрации ПО равной 0,2-1 % с обеспечением запыленности на выходе из пылеуловителя до санитарных норм.

### **Основные выводы.**

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что в мокрых пенных пылеуловителях осаждение пыли определяется механизмами гравитационным, инерционным, зацеплением, под действием центробежной силы, диффузии, а эффективность пылеулавливания зависит от концентрации и типа ПАВ в растворе, концентрации пыли на входе, поверхностного натяжения раствора и пленки пузырьков ВМП, тангенциальной составляющей скорости загрязненного воздушного потока, стойкости, кратности пены, ее смачивающей способности, а также от величины зазора между уровнем поверхности раствора в улитке и торцом вертикальной колонны.

2. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность пылеподавления при бурении в условиях отрицательных температур мокрыми пенными пылеуловителями с растворами ПАВ концентрацией не более 0,2-0,8 % и антифризные добавки, например, полигликоль – до 40-50%.

3. Выполнена оценка температуры выходящего из скважины загрязненного потока воздуха с учетом прироста температуры воздуха в призабойной зоне и в кольцевом пространстве скважины, а также с учетом глубины температурных колебаний на поверхности земли в течение суток, глубины и температуры нейтрального и годового слоев земли, их взаимосвязи между собой и глубины бурения.

4. Эффективность улавливания частиц в условиях отрицательных температур растворами ПАВ с антифризной добавкой зависит от размеров взаимодействующих фаз (пылинки и пузырька ВМП), вязкости и плотности пенообразующего раствора, поверхностного натяжения жидкости и пены, смачиваемости пыли, температуры пылеулавливающего раствора и пены и от скорости соударения частицы с пылеулавливающей поверхностью и пеной.

5. Разработана технология пылеподавления и конструктивные параметры установки при бурении разведочно-эксплуатационных скважин и шпуров в условиях отрицательных температур окружающей среды (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ) и массива

г.п. ( $0^{\circ} \div - 12^{\circ}$ ), использование которых обеспечивает запыленность на выходе из установки до санитарных норм на открытых и подземных горных работах.

6. Результаты исследований могут быть использованы для пылеподавления при отрицательных температурах на других технологических процессах при ведении геологоразведочных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых.

**Публикации.** Основные положения работы изложены в публикациях, 3 из которых – в рецензируемых и рекомендованных ВАКом изданиях:

1. Овчинников Д.Ю., Исследование пылеподавления при шарошечном бурении в условиях отрицательных температур. // Изв. ВУЗов «Геология и техника разведки», №5// М.: РГГРУ, 2009.- с. 72-74.

2. Овчинников Д.Ю., Исследование пылеулавливающей способности пенного пылеуловителя. //Горный информационно –аналитический бюллетень, вып. №5, «Аэрология»// МГГУ.: 2009.-с. 179-184.

3. Овчинников Д.Ю., Изучение температурных режимов и схем пылеподавления при бурении в условиях отрицательных температур.// Горный информационно-аналитический бюллетень, вып. №6, «Аэрология»// МГГУ.: 2009.- с. 230-238

4. Овчинников Д.Ю., соавтор Грабчак Л.Г. Совершенствование технологии пылеподавления в процессе бурения при отрицательных температурах. //Материалы научно-практическая конференция 15-17.04.08 г. в РГГРУ «Геоэкологические и инженерно-геологические проблемы развития городов и промышленных комплексов г. Москвы»// М.: РГГРУ, 2008.- с.112.

5. Овчинников Д.Ю., соавтор Грабчак Л.Г. Конструктивные особенности установки для пылеподавления при бурении в условиях отрицательных температур. //У1 межд. научно-практическая конференция «Наука и новейшие технологии при поисках, разведке и разработке месторождений п.и.», 6-9 апреля.// М.: РГГРУ, 2010.- с.29.