

А.Н.Давиденко<sup>1</sup>, Б.Т.Ратов<sup>2</sup>, А.А.Игнатов<sup>1</sup>,  
А.Т.Тулелбергенов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет  
им. К.И.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

## **О СИЛОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ С СОДЕРЖИМЫМ КАВЕРН ПРИ РАБОТЕ УСТРОЙСТВА ПО ОЧИСТКЕ СТВОЛА СКВАЖИНЫ**

---

---

**Аннотация.** Приведены краткие сведения о явлении кавернообразования в стволе скважины. Рассмотрены условия устойчивости шламовых скоплений в осложненных интервалах. Описаны силовые характеристики потока жидкости при его воздействии на отдельную породную частицу. Исследован механизм воздействия активных потоков промывочной жидкости на кавернозные скопления шлама. Составлены уравнения движения частиц шлама. Показана прямая зависимость эффективности буровых работ от качества проведения операций по креплению скважин. Обоснованы технологические параметры устройства для обработки кавернозной зоны скважины, исходя из установленных зависимостей формирования и удаления глинисто-шламовых скоплений и их влияния на результаты тампонирования скважин. Доказана эксплуатационная надежность устройства для обработки ствола скважины. Полученные результаты теоретических и лабораторных исследований могут использоваться при создании эффективной технологии крепления и тампонирования ствола скважины с высокими технико-экономическими показателями.

**Ключевые слова:** скважина, каверна, очистка каверн, глинисто-шламовые скопления, ствол скважины, угол откоса, промывочная жидкость.



**Түйіндеме.** Ұңғы оқпанында каверна пайда болу көрінісі туралы қысқаша мәліметтер берілген. Күрделі аралықтарда шлам үйінділерінің орнықтылық шарттары қарастырылған. Сұйықтық ағысының тау жынысының жеке бөлшегіне әсер ету кезіндегі күштік сипаттамалары сипатталған. Каверналарға жиналған шламға жуу сұйығының белсенді ағысының әсер ету механизмі зерттелген. Шлам бөлшектерінің қозғалыс теңдеулері құрастырыл-

ды. Бұрғылау жұмыстарының тиімділігі ұңғыларды бекіту операцияларын жүргізу сапасына тікелей тәуелді екендігі көрсетілген. Сазды-шламды шоғырлардың пайда болуы және жойылуының қалыптасқан тәуелділігіне сүйене отырып, ұңғының каверна пайда болған аймағын өңдеуге арналған құрылғының технологиялық параметрлері және олардың ұңғыны тампондау нәтижелеріне тигізетін әсері қарастырылған. Ұңғы оқпанын өңдеуге арналған құрылғының пайдалану сенімділігі дәлелденді. Теориялық және зертханалық зерттеулердің нәтижелері техникалық-экономикалық көрсеткіштері жоғары ұңғы оқпанын бекіту және тампондаудың тиімді технологиясын жасауға негіз бола алады.

**Түйінді сөздер:** ұңғы, каверна, каверналарды тазалау құрылғылары, сазды-шламды шоғыр, ұңғы оқпанын өңдеуге арналған құрылғы, жуу сұйықтығы.



**Abstract.** The subject of the article is the phenomenon of caving in the bore hole. The terms of stability of slime accumulations are considered in the in the cavity intervals. Power descriptions of stream of liquid are described at his affecting separate rock particle. The mechanism of influence of active streams of drilling liquid is investigational on the cavity congestions of mud. Make equations of forces defiant moving grains of mud. Direct dependence of efficiency borings works is shown on quality of carrying out operations on timbering bore holes. Substantiation technological parameters device for processing tube of brine cavity in the bore hole, being based on set dependences forming and withdrawal clay-mud congestions and their influence on the results of tamponing bore holes. The serviceability of designed device for processing tube the bore hole is proved. The got results of theoretical and laboratory investigations can be applied for making of effective technology of timbering and tamponing of tube of bore hole with high technical and economic indexes.

**Key words:** bore hole, flowrate, device for cleaning cavities, clay-mud accumulations, for wellbore treatment device, drilling mud.

**Введение.** Всестороннее изучение широкого круга литературных источников, а также данных промысловых исследований и наблюдений позволяет с уверенностью утверждать следующее: кавернообразование и все связанные с ним явления – это один из самых распространенных видов осложнений при проводке скважин. Указанное относится к месторождениям полезных ископаемых, разрабатываемых на территории Американского континента, в частности США, Колумбии, Венесуэлы. Также

мощные толщи пород, склонных к кавернообразованию, представлены в геологических разрезах скважин, сооружаемых на месторождениях Средней Азии, Восточной и Западной Европы, Центрального Предкавказья, Индии [1, 2].

Наличие зон местных уширений в стволе скважины грозит возникновением аварийных ситуаций и существенно снижает технико-экономические показатели эксплуатации месторождений. Исследования и разработки применительно к перечисленным осложнениям направлены на совершенствование технологических мероприятий при строительстве скважин и их инструментального обеспечения [1-3].

Одним из наиболее важных этапов в последовательности решения вопросов проектирования технологически обоснованной программы очистки каверн с помощью специального устройства, трансформирующего вращение его лопастного исполнительного органа в энергию активных струй жидкости [4], является выяснение принципов их гидродинамического взаимодействия с объектом обработки, представленным глинисто-шламовыми скоплениями. В связи с тем, что шламовые скопления представляют собой некоторую совокупность продуктов разрушения горных пород и глинистой фазы – это воздействует на механизм изучаемых явлений.

Для выявления адекватной картины взаимодействия активных струй со шламовыми образованиями необходим качественный и количественный анализ ведущих факторов, коренным образом влияющих на процесс разрушения и удаления кавернозных скоплений. Решение поставленной задачи заключается в изучении силового воздействия потока жидкости на частицы, слагающие шламовые скопления с возможно полным учетом специфических структурных и физико-химических свойств, присущих продуктам разрушения горных пород и глинам того или иного минералогического состава.

**Цель настоящей работы** – экспериментально-теоретическое изучение взаимодействия активных струй жидкости с глинисто-шламовыми образованиями с учетом особенностей каждой из фаз их слагающих.

**Методы исследований.** Приблизительно о размерах кавернозных интервалов и объеме образующихся в них шламовых скоплений можно судить по величине угла их откоса  $\varphi$ . В связи с тем, что частицы глинисто-шламовых образований находятся в кавернах в условиях равновесия, то, очевидно, удалить их можно с помощью его нарушения. Математическое выражение условия равновесия отдельной частицы скоплений будет следующим:

$$n_p = \frac{\Sigma Q}{\Sigma R} \quad (1)$$

где  $n_p$  – коэффициент равновесия шламовой частицы;

$\Sigma Q$  – сумма сил, вызывающих перемещение частицы по некоторой оси;

$\Sigma R$  – сумма сил сопротивления перемещению частицы по той же оси.

Таким образом, чтобы обеспечить транспортировку частиц, необходимо приложить внешние силы, источником которых в случае применения устройства по очистке каверн будут активные струи жидкости [5]. Из выражения (1) вытекают некоторые важные следствия в отношении равновесия кавернозных накоплений:

а) глинисто-шламовые скопления находятся в состоянии предельного равновесия, тогда

$$\Sigma Q = \Sigma R, \quad (2)$$

при этом  $n_p = 1$ .

б) глинисто-шламовые скопления находятся в состоянии устойчивого равновесия:

$$\Sigma Q < \Sigma R, \text{ а } n_p < 1, \quad (3)$$

в) глинисто-шламовые скопления находятся в неустойчивом состоянии:

$$\Sigma Q > \Sigma R, \text{ а значит } n_p > 1. \quad (4)$$

Анализируя полученные выражения, можно утверждать, что обеспечить удаление шламовых скоплений работы устройства

по очистке каверн в режиме выполнения выражений (2)-(3) невозможно. Для соблюдения надлежащих требований по очистке осложненных интервалов необходимо выполнение неравенства (4), а именно  $n_p > 1$ . Причем значение  $n_p$  следует увеличивать с повышением степени неопределенности скважинных условий. Величина  $n_p$  будет являться надежным инструментом создания эффективного режима разрушения и удаления шламовых скоплений, учитывающим неизбежно возникающие неточности в установлении сил, вызывающих перемещение частицы и сил, ему противодействующих.

Исходя из сказанного выше, задача определения необходимой скорости струй, покидающих лопастной орган, сводится к отысканию гидродинамических соотношений в комплексе «активный поток жидкости – твердая частица». Прямое решение поставленного вопроса в преломлении к кавернозным шламовым накоплениям невозможно вследствие разнообразности, сложности и многочисленности действующих факторов. Реально возможным видится подход, основанный на рассмотрении ряда идеализированных схем, механически вполне определимых, постепенное усложнение которых приведет к установлению расчетных связей для глинисто-шламовых скоплений.

Прежде всего требуется установить характер основных усилий, развиваемых на отдельной шламовой частице. Для возможности выявления возникающих на этой частице усилий с предельной ясностью схематизируем ее в виде сферы, расположенной на плоскости с углом наклона, равным  $\varphi$  (рис. 1).

В соответствии с основными представлениями механики и гидродинамики [6, 7], запишем поочередно все действующие на частицу силы, в проекциях на выбранные оси  $x$  и  $y$ .

Усилия, действующие в направлении оси  $x$ :

— Сила тяжести частицы шлама

$$Q_T = m_{\text{ш}} g \sin \varphi, \quad (5)$$

где  $m_{\text{ш}}$  – масса частицы шлама, кг;

$m_{\text{ш}} g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

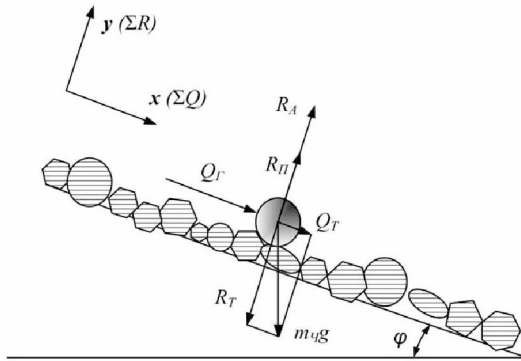


Рис. 1. Схема распределения сил на изолированной шламовой частице при ее обтекании активным потоком

— Сила гидродинамического давления на частицу

$$= C_x \rho f_u \frac{\Delta V^2}{2}, \quad (6)$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления при движении частицы, определение которого для условий транспортирования шлама представляет значительные трудности [8];

$f_u$  – площадь проекции поверхности транспортируемой частицы на нормаль к линии действия силы;

$\rho$  – плотность промывочной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta V$  – скорость движения частицы относительно транспортирующей ее жидкости, м/с.

$$\Delta V = V - V_y,$$

где  $V$  и  $V_y$  – скорости активного потока жидкости и перемещения шламовой частицы соответственно, м/с.

— Сила инерции в случае ускоренного движения частицы

$$Q_{II} = m_{\text{ч}} \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (7)$$

где  $\frac{d^2x}{dt^2}$  – ускорение частицы при ее движении вдоль оси  $x$ , м/с<sup>2</sup>.

Усилия, действующие в направлении оси  $y$ :

— Сила тяжести частицы шлама

$$R_T = m_s g \cos \varphi. \quad (8)$$

— Выталкивающая сила, определяемая согласно закону Архимеда

$$R_A = \rho g v_q, \quad (9)$$

где  $v_q$  – объем транспортируемой частицы, м<sup>3</sup>.

— Подъемная сила, возникающая в результате несимметричного обтекания частицы

$$R_{II} = C_y f_{цр} \frac{\Delta V^2}{2}, \quad (10)$$

где  $C_y$  – коэффициент подъемной силы при обтекании частицы активным потоком жидкости.

— Сила инерции в случае ускоренного движения частицы в направлении, нормальном линии откоса шламовых образований

$$R_{II} = m_{ч} \frac{d^2y}{dt^2}, \quad (11)$$

где  $\frac{d^2y}{dt^2}$  – ускорение частицы при ее движении вдоль оси  $y$ , м/с<sup>2</sup>.

Учитывая сложность характера перемещения частиц под воздействием активных струй потока и невозможность выделения интервалов ускоренного и равномерного движений, усилия по выражениям (7) и (11) исключим из рассмотрения; тогда согласно (1) запишем отдельно алгебраические суммы сил, вызывающих перемещение частицы  $\sum Q$ , и сил, ему противодействующих  $\sum R$ :

$$\Sigma Q = Q_T + Q_G \quad (12)$$

и

$$\Sigma R = R_T - R_A - R_{II} \quad (13)$$

Выражение (13) не может считаться соответствующим реальным условиям применительно к механизму разрушения глинисто-шламовых скоплений, так как оно не учитывает силы структурно-механического и химического взаимодействия между отдельными частицами. Учет указанных сил возможен на основе введения суммарного поправочного коэффициента  $k_{\Sigma}$ . Причем его значения будут изменяться в зависимости от состояния частиц. Для частиц, находящихся в покое, коэффициент будет суммарным поправочным статическим –  $k_{\Sigma c}$ , а для движущихся частиц он преобразуется в суммарный поправочный динамический –  $k_{\Sigma d}$ . Совершенно очевидно, что  $k_{\Sigma c} > k_{\Sigma d}$ . Об этом свидетельствуют и результаты специальных лабораторных исследований.

Из выражений (5)-(11) ясно видно, что единственным рычагом влияния на равновесие шламовых частиц является соблюдение соответствующего скоростного режима активных струй жидкости, сходящих с лопастного исполнительного органа устройства для очистки каверн, чем подтверждается правильность выбора принципа его действия [9].

Таким образом, для частицы, находящейся в состоянии покоя, иными словами, в отсутствие движения промывочной жидкости, выражения (12)-(13) запишутся в следующем виде:

$$\Sigma Q = Q_T \quad (14)$$

и

$$\Sigma R = (R_T - R_A) k_{\Sigma c} \quad (15)$$

Силу страгивания  $F_c$ , которую необходимо приложить к частице для обеспечения возможности ее смещения, можно найти из следующего выражения:

$$F_c = (R_T - R_A) k_{\Sigma c} - Q_T \quad (16)$$



В момент после возникновения смещения шламовой частицы ее состояние будут описывать выражение (12) и преобразованное уравнение (13)

$$\Sigma R = (R_T - R_A - R_{II}) k_{\Sigma d}. \quad (17)$$

После включения в работу лопастного органа устройства по очистке каверн возникает движение активных струй жидкости, скорость которых за короткий промежуток времени стабилизируется и становится равномерной: это справедливо лишь для участка струй от кромки лопасти до плоскости поверхности обработки [5]. При этом происходят следующие изменения силовых характеристик: сила  $Q_T$  возрастает от нулевого значения до предельного при данной  $\Delta V$ . Вместе с тем аналогичная ситуация происходит и с силой  $R_{II}$ .

**Обсуждение результатов исследований.** Экспериментальные исследования показали, что после возникновения движения активных струй совершается размыв глинистой фазы, находящейся на контактных поверхностях частиц породы. В случае преодоления порога  $\Sigma R$  возникает смещение частицы. Одновременно происходит скачкообразное изменение соотношения сил по параметрам  $\Sigma Q$  и  $\Sigma R$ , что приводит к появлению необходимых условий выполнения неравенства (4). Указанное является следствием следующего: поправочный статический коэффициент значительно больше динамического, а именно  $k_{\Sigma c} > k_{\Sigma d}$ . В дальнейшем возможны следующие типы перемещения частицы, коррелирующиеся со значением угла  $\varphi$ : перекатывание, взвешивание или скольжение (рис. 2). Причем эти виды движения характерны в основном для окатанных частиц, в случае их иной формы схемы перемещения будут другими. Вместе с тем условия обтекания частиц и их удаления за пределы кавернозной зоны не будут устойчивыми во времени по причине постоянного локального изменения гидродинамических характеристик шламовых зерен и траектории их движения.

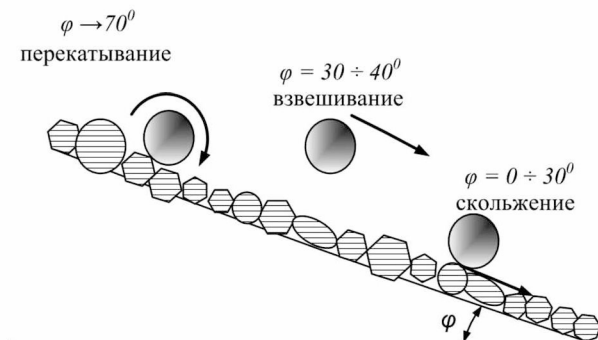


Рис. 2. Схемы возможных вариантов перемещения шламовой частицы под воздействием активного потока

На рис. 3 представлен график зависимости шламонакопления в кавернозной зоне скважины, а значит, и его производной – угла откоса  $\varphi$  как показателя объемно-массовых характеристик, агрегатированных в осложненных интервалах скоплений. График

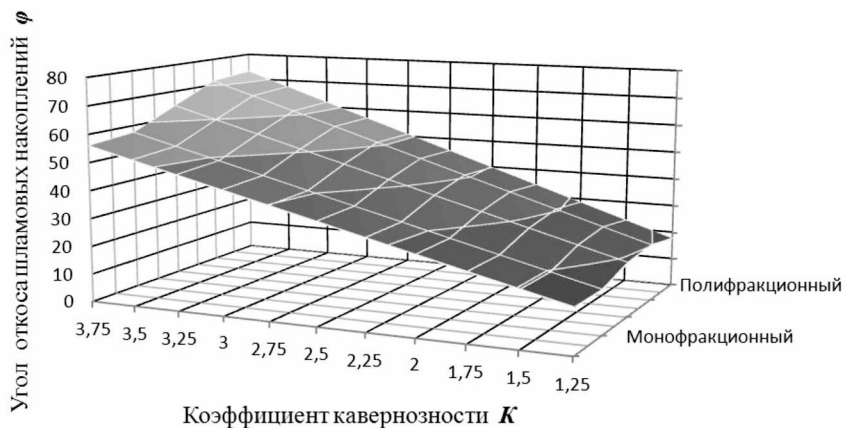


Рис. 3. Зависимость результатов шламонакопления от коэффициента кавернозности  $K$  для групп поли- и монофракционных зерновых составов

получен в результате аппроксимации опытных данных по шламонакоплению зерновых материалов с равномерно распределенным гранулометрическим составом в полифракционных группах и порознь крупных и мелких в монофракционных; достоверность аппроксимации составляет в среднем 0,91-0,93. Зависимость угла откоса  $\varphi$  от коэффициента  $K$  во всех группах зернового состава и в особенности полифракционного. Рассмотренные материалы исследований являются весомым свидетельством в пользу выдвинутого ранее положения [5] о том, что одним из главных интегральных параметров, определяющих ход и результативность процесса обработки кавернозных скоплений шлама, является угол их откоса  $\varphi$ . Представленные результаты теоретических и лабораторных исследований служат основой создания эффективной технологии подготовки скважин к креплению и тампонированию [10-13].

**Выводы.** Рассмотрены вопросы устойчивости и возможности разрушения глинисто-шламовых скоплений в кавернозных интервалах скважины. Описана схема распределения усилий, возникающих на изолированной шламовой частице в результате ее обтекания активным потоком жидкости. Составлены уравнения для сил, под воздействием которых происходит перемещение частиц. Теоретическими и экспериментальными исследованиями показана ведущая роль угла откоса шламовых скоплений в реализации механизма их удаления.

### Список литературы

- 1 Drilling Engineering. Heriot-Watt Institute of Petroleum Engineering. Edinburgh, 2005. – 572 p.
- 2 *Rabia H.* Entrac Consulting. Well Engineering and Constructions, 2002. – 54 p.
- 3 *Devereux S.* Drilling engineering for non Drilling Engineers, PennWell Corporation, 2012. – 3 p.
- 4 *Давиденко О.М., Игнатов А.О., Кутепов И.И.* До питання про вдосконалення пристроїв для оброблення стовбура сверд-

ловини, Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. – Киев: Изд-во ИСМ им. В.Н.Бакуля НАН Украины. – 2010. – Вып. 13. – С. 99-103.

5 *Давиденко А.Н., Игнатов А.А.* Некоторые особенности работы устройства по подготовке скважины к креплению, Розробка родовищ: Зб. наук. пр. Днепропетровск: Літограф, 2015. – С. 501-506.

6 *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М.: Наука. 1961. – 824 с.

7 *Штеренлихт Д.В.* Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

8 *Кожевников А.А., Игнатов А.А.* Аналитические исследования скорости оседания твердых тел в неподвижной жидкости // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2005». – Днепропетровск: РВК НГУ, 2005. – С. 257-263.

9 Пат. на вин. України 90541. Пристрій для обробки стовбура свердловини; Е21В 37/02 / О.М.Давиденко, А.О.Ігнатов, В.В.Яцик. – № а 2008 05093; Заявл. 21.04.2008; Опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.

10 *Ратов Б.Т., Кожевников А.А., Судаков А.К.* Агрегат для цементирования неглубоких буровых скважин // Нефть и газ. – 2016. – № 1 (91). – С. 91-98.

11 *Билецкий М.Т., Касенов А.К., Ратов Б.Т., Жанабаева Т.А., Утепов З.Г.* Результаты исследований по совершенствованию рецептур ингибирующих буровых растворов // Новости науки Казахстана. – 2015. – № 3 (125). – С. 36-51.

12 *Biletski M.T., Ratov B.T., Kasenov A.K., Ibyldaev M.H.* Caving control while drilling through highly dispersible clays at uranium deposits of Kazakhstan // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. Albena, Bulgaria. – 2015. – P. 157-164.

13 *Ratov B.T., Fedorov B.V., Sabirov B., Pozdeeva G.P., Otebaev M.* On some trends in construction improvements of rock cutting tools for drilling oil and gas wells. International Multidisciplinary

Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. Albena, Bulgaria. – 2015. P. 809-814

14 *Ali P., Issham I., Zulkefli Y., Parham B. and Ahmad S.* Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. – 2012. – Vol. 2. – P. 149-156.

**Давиденко Александр Николаевич**, доктор технических наук, заведующий кафедрой техники разведки месторождений полезных ископаемых, e-mail: [aleks\\_dan1610@rambler.ru](mailto:aleks_dan1610@rambler.ru)

**Ратов Боранбай Товбасарович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии и техники бурения скважин, e-mail: [ratov69@mail.ru](mailto:ratov69@mail.ru).

**Игнатов Андрей Александрович**, старший преподаватель кафедры техники разведки месторождений полезных ископаемых, e-mail: [A\\_3000@i.ua](mailto:A_3000@i.ua).

**Тулепбергенов Алмас Тулепбергеноулы**, преподаватель кафедры технологии и техники бурения скважин, e-mail: [almaskz\\_85@mail.ru](mailto:almaskz_85@mail.ru)