

**С.Ф. Власов**

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ  
ПО СТРУЙНОМУ ЗАКРЕПЛЕНИЮ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОД**

Наведено основні досягнення наукового напряму струйного закріплення слабких дисперсних порід, що забезпечують безпечно ведення гірничих робіт та будівництво підземних споруд в особливо складних умовах.

Приведены основные достижения научного направления струйного закрепления слабых дисперсных пород, обеспечивающих безопасное ведение горных работ и строительство подземных сооружений в особо сложных условиях.

Basic achievements of scientific direction of the stream fixing of weak breeds of dispersions, providing the safe conduct of mountain works and building of underground buildings in especially difficult terms are resulted.

В 2008 г. исполнилось 15 лет научному направлению по струйному закреплению дисперсных пород, возглавляемому профессором кафедры подземной разработки месторождений Власовым С.Ф. За прошедший период были защищены одна докторская (С.Ф. Власов) и пять кандидатских диссертаций (С.В. Ткачук, А.Б. Владыко, С.Е. Тимченко, О.А. Устивицкий, Н.А. Максимова-Гуляева).

Идея научного направления состоит в целенаправленном изменении физико-механических свойств и состояния дисперсных водонасыщенных пород под воздействием высоконапорных струй твердеющих растворов, обеспечивающих безопасное ведение горных работ и строительство подземных сооружений в особо сложных условиях.

В рамках научного направления получены следующие основные научные и практические результаты.

Профессором Власовым С.Ф. совместно с Ткачуком С.В. создана теория расчета рабочих параметров струйной технологии закрепления слабых дисперсных пород в зависимости от физико-механических свойств закрепляющего раствора и закрепляемой дисперсной породы. Свойства закрепляемой с помощью струйной технологии породы, ранее описываемые в рамках теории динамики грунтов, впервые были описаны с помощью теории турбулентных струй. Это позволило при определении глубины проникания струи в породу учесть турбулентный характер распространения струи и установить зависимость изменения скорости струи вдоль оси ее распространения.

Использовано понятие “ударная вязкость” для слабых дисперсных пород. Для проведения исследований по определению ударной вязкости этих пород была разработана методика и создана лабораторная установка, на которой впервые были получены зависимости ударной вязкости от степени влажности для связных и несвязных дисперсных пород. Установлено, что при увеличении влажности до 25% ударная вязкость для связных пород уменьшается на 50-80 Дж/м<sup>2</sup> за счет ослабления поверхностных связей между частицами породы, а у несвязных – возрастает на 40-60 Дж/м<sup>2</sup> за счет увеличения поверхностных сил в межпоровом пространстве дисперсной породы.

Получена зависимость экспериментальной функции, входящей в теорию турбулентных струй от соотношения плотностей двух перемешивающихся сред, что позволило учесть при теоретических расчетах отличие плотности струи закрепляющего раствора от плотности закрепляемой породы.

Установлены граничные условия проникания высоконапорной струи закрепляющего раствора в слабую дисперсную породу, что позволяет определять конечную глубину распространения струи раствора в этой породе:

$$h = \sqrt{\frac{2,73 \cdot d_0^3 \cdot u_0}{\pi \cdot d_1 \cdot \omega \cdot c \cdot \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cdot k}}$$

где  $d_0$  – диаметр сопла, м;  $u_0$  – скорость струи закрепляющего раствора на выходе из сопла, м/с;  $d_1$  – диаметр рабочего инструмента, м;  $\omega$  – скорость вращения рабочего инструмента, м/с;  $c$  – функция закона изменения;  $\rho_2/\rho_1$ ;  $\rho_1$  – плотность закрепляющего раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – плотность закрепляемой породы, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент учитывающий время поднятия и одного оборота рабочего инструмента.

На основании теоретических и экспериментальных исследований различных форм и геометрических размеров насадок, которые можно применять при струйной технологии закрепления дисперсных пород, были определены рациональные геометрические размеры и формы насадок, предотвращающие возникновение явления кавитации при высоких давлениях и обеспечивающие оптимальное качество струи. Установлены новые закономерности проникания высоконапорных струй в слабые дисперсные породы в зависимости от соотношений плотностей закрепляющего раствора и обрабатываемой породы, ударной вязкости этой породы, скоростей поднятия и вращения рабочего инструмента, расхода и давления струи закрепляющего раствора, геометрической формы сопла, формирующей струю, на основании которых были разработаны способы струйного закрепления пород, подтвержденные патентами Украины (рис. 1-2).

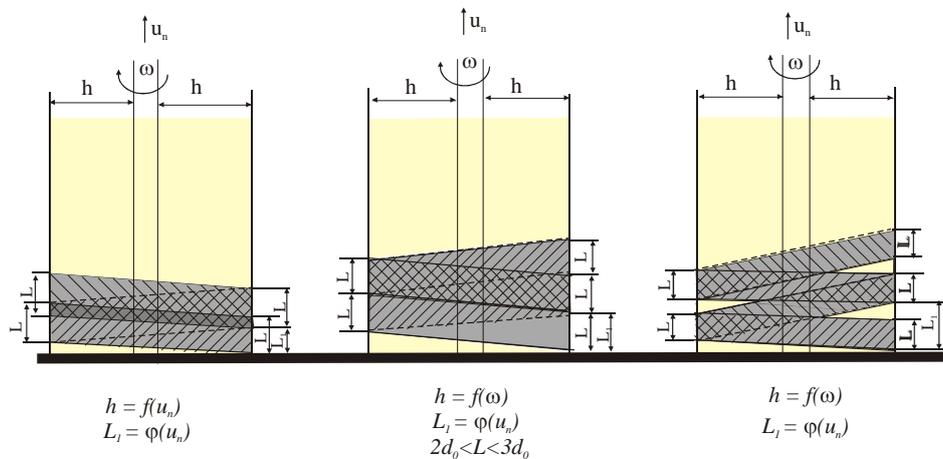


Рис. 1. Зависимость формирования закрепленного элемента от скорости вращения и поднятия рабочего инструмента

Получена критериальная зависимость, включающая видоизмененный критерий Рейнольдса, критерий Фурье и критерий, описывающий соотношение плотностей закрепляющего раствора и обрабатываемой породы, что позволило пересчитать давление нагнетания и расход закрепляющего раствора, время действия и глубину проникания струи, полученные в процессе моделирования для натуральных условий.

На основании лабораторных исследований определено оптимальное водоцементное отношение суспензий на цементном базисе, применяемых для струйной технологии закрепления дисперсных пород, обеспечивающее необходимую прочность закрепленной породы.

Установлены закономерности влияния качества и количества закрепляющих растворов на прочность породоцементных элементов, позволяющие определить рациональные параметры процесса закрепления при решении различных горнотехнических задач.

Впервые разработана классификация слабых дисперсных пород в зависимости от глубины проникания в них высоконапорной струи закрепляющего раствора, которая позволяет учитывать ударную вязкость этих пород, производить предварительный выбор способов, а также технологических параметров струйного закрепления.

Доцент **Владыко А.Б.** обосновал технологию создания противофильтрационных завес струями высокого давления закрепляющих растворов (2000).

**Основные научные результаты его работы:** обоснованы технологические параметры формирования противофильтрационных завес в слабых дисперсных породах с помощью струй закрепляющих растворов, позволяющие управлять прочностными и фильтрационными свойствами создаваемых противофильтрационных завес. Установлены закономерности глубины проникания высоконапорных струй закрепляющих растворов от плотности закрепляющего раствора, ударной вязкости дисперсной породы, диаметра сопла и начальной скорости струи при невращающемся струйном мониторе, а также зависимости максимальной глубины проникания высоконапорной струи от скорости поднятия монитора, что обеспечивает эффективный расход раствора. В результате экспериментальных и аналитических исследований установлена закономерность образования зоны чистого цемента при проникании струй закрепляющих растворов в мелкозернистые пески, обеспечивающей низкий коэффициент фильтрации формируемой завесы, получены новые зависимости влияния коэффициента фильтрации и прочности от количества закрепляющего раствора в породорастворных элементах, позволяющие определять рациональные параметры формирования толщины противофильтрационных завес при решении различных горнотехнических задач.

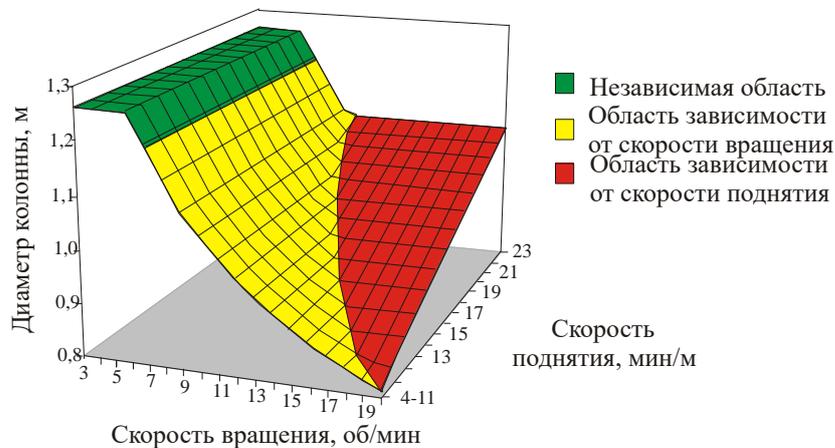


Рис. 2. Зависимость диаметра закрепленной колонны от скоростей вращения и поднятия струйного монитора

Доцент **Тимченко С.Е.** обосновала параметры интенсификации процессов струйного закрепления пород при магнитной обработке цементных растворов (2001).

**Основные научные результаты ее работы:** определены рациональные параметры магнитной обработки цементных растворов, используемые в струйном закреплении пород при решении различных горнотехнических и строительных задач. В результате выполненных экспериментальных исследований доказано, что целесообразно подвергать магнитной обработке цементный раствор, а не воду для его затворения. Рациональные параметры магнитной обработки цементных растворов, при которых наступает оптимальное изменение их физико-механических свойств, таковы: индукция магнитного поля  $B = 0,36$  Тл, скорость обработки жидкой среды в магнитном поле – 1,79 м/с. Получены закономерности изменения физико-механических свойств (прочности на одноосное сжатие и плотности цементного камня, времени начала и конца схватывания и вязкости) цементных растворов и полученного из них цементного камня от величины индукции

магнитного поля. Доказано, что прочность на одноосное сжатие цементного камня, полученного из активированных магнитным полем растворов, при изменении индукции последнего от 0 до 0,6 Тл описывается произведением экспоненциальной и степенной зависимостей, имеющей экстремум в точке  $B = 0,36$  Тл.

Установлена зависимость прочности закрепленных среднезернистых песков влажностью 2-27% от прочности цементного камня, получаемого из используемого твердеющего раствора. Для среднезернистых песков установлена связь количества цементного раствора в закрепленных элементах с первоначальной влажностью породы. На основании теории движения вязкой несжимаемой турбулентной струи в трубопроводе разработаны компьютерные программы расчета коэффициента потерь давления в нагнетающей системе. Обоснованы технологические параметры струйного закрепления пород с применением активизации магнитным полем используемых для этого твердеющих цементных растворов.

**Устивицкий О.А.** обосновал технологические параметры струйного закрепления обводненных грунтов (2003).

**Основные научные результаты его работы:** обоснованы технологические параметры струйного закрепления обводненных грунтов, позволяющие управлять прочностными свойствами закрепленных грунтов в условиях их обводненности; необходимость замены ударной вязкости грунтов на параметры сдвига (угол внутреннего трения и коэффициент сцепления), что позволило перейти к единой методике определения указанных показателей как для связных, так и несвязных грунтов с различной степенью влажности. Для этого были установлены зависимости ударной вязкости от влажности связных и несвязных грунтов различной плотности. На основании этого получена зависимость максимальной глубины проникания закрепляющего раствора в грунт от его сдвиговых характеристик. Установлено, что прочность защитных элементов, сооружаемых с помощью струйного закрепления в обводненных несвязных грунтах, уменьшается в 1,5-1,7 раза. Получена зависимость прочности закрепленного элемента от количественного соотношения раствора и обводненного грунта. Достижение проектной прочности при решении различных горнотехнических задач обеспечивается выбором рациональных скоростей вращения и подъема рабочего монитора. Установлено, что прочность контактной зоны растворогрунтовых элементов зависит от продолжительности времени между их стыковкой и может снижаться в пределах 30%, что подтверждается необходимостью стыковки этих элементов с минимальными технологическими перерывами. Выполнен анализ эффективности использования струйного закрепления грунтов с обжатием и без обжатия струй раствора сжатым воздухом. Наиболее эффективным как с экономической, так и технологической точки зрения является струйный способ закрепления грунтов без обжатия струи раствора сжатым воздухом.

Доцент **Максимова-Гуляева Н.А.** обосновала способ повышения устойчивости оползнеопасных склонов с помощью струйной технологии закрепления грунтов (2006).

**Основные научные результаты ее работы:** обоснован способ повышения устойчивости оползнеопасных склонов с помощью струйного закрепления грунтов за счет формирования свай различных конструкций с добавкой в цементно-лессовую смесь извести, а также их вибрированием и сегментным армированием. На основании анализа специфических особенностей рельефообразования и свойств покровных лессовых отложений Приднепровского региона выделены оползни днепропетровского типа. Получены закономерности изменения механических свойств (пределы прочности при сжатии, изгибе и срезе) цементолессовых смесей при различных количествах извести и цемента в зависимости от сроков твердения. В процессе исследования прочностных показателей цементно-лессовых смесей зафиксировано снижение прочности в 1,05-1,3 раза в зависимости от процентного содержания цемента и извести. Это явление обусловлено развитием высоких внутренних напряжений, вызывающих расширение,

микротрещинообразование и, как следствие – снижение прочности в период начала интенсивного формирования мелкокристаллической жесткой структуры. Установлено, что скорость набора прочности прямо пропорциональна процентному содержанию цемента и извести в смеси. Получена зависимость прочности цемента-лессовой смеси от времени ее виброобработки продолжительностью 60 и 120 с частотой 50 Гц. Эффективность виброобработки смеси с 5% извести и 50% цемента в 42-дневном возрасте при 60 с обработки увеличивается в 1,2 раза, при 120 с – в 1,4 раза. Максимальное значение прочности при сжатии соответственно 9,2 и 10,5 МПа. Разработана методика расчета сегментного армирования противооползневых свай. Предложенное расположение армирующих элементов позволяет полнее использовать механические свойства разнородных материалов. При этом максимальные напряжения в стальных элементах достигают предела текучести, а в цементолессовой смеси – напряжения хрупкого разрушения при сжатии. Это дало возможность обосновать типоразмерный ряд армированных противооползневых свай. Обоснована целесообразность использования в качестве элементов противооползневых конструкций сдвоенных секущих свай.

**Практическое значение.** Разработаны основы управления свойствами и состоянием слабых дисперсных пород с помощью высоконапорных струй закрепляющих растворов, что позволило создать эффективные способы (патенты № 10333 А; 10392 А; 15071 А; 20380 А, 37993 А), технологию и средства струйного закрепления, обеспечивающие необходимую безопасность при решении различных горнотехнических задач в процессе освоения подземного пространства городов Украины.

Разработаны два способа струйного закрепления дисперсных пород с обработкой цементных растворов магнитным полем, в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к омоноличиваемым элементам: 1) активизация цементных растворов производится непосредственно в процессе закрепления пород (для получения породорастворных конструкций переменного сечения); 2) с предварительной активизацией цементных растворов в магнитном поле (для получения конструкций постоянного сечения).

Разработаны компьютерные программы по определению технологических параметров и схемы струйного закрепления пород при проведении вертикальных стволов и горизонтальных выработок неглубокого заложения, создании гидроизоляционной завесы вокруг подземных камер, закреплении оснований под зданиями и сооружениями, а также методика проектирования противооползневых конструкций, позволяющая обеспечивать эффективное использование струйной технологии закрепления лессовых склонов. Технологические схемы согласованы с проектным институтом “Днепрогипрошахт” и утверждены ДонУГИ.

Разработан, смонтирован и опробован в полигонных условиях опытный образец установки по струйному закреплению дисперсных пород на базе буровой УРБ-2А-2 и шасси ЗИЛ-131, которая позволяет выполнять работы по закреплению с поверхности на глубину до 30 м (рис. 3).

Результаты исследований в виде рекомендаций внедрены в проекты Днепрогипрошахт, Днепрометропроект и Укртоннельстройэко. Результаты исследований также прошли технологическую апробацию в фирме “Бауэр” (Германия) при строительстве Берлинского метрополитена.

Проведены испытания экспериментальной установки при закреплении песков на трассе станции открытого заложения “Набережная им. Ленина” Днепропетровского метрополитена, которые подтвердили обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций.



*Рис. 3. Установка и результаты экспериментальных работ по струйному закреплению дисперсных пород с вращением (а) и без вращения струйного монитора (б)*

**Публикации.** Всего опубликовано 105 научных трудов и авторских свидетельств, десять патентов, в том числе две монографии. Результаты исследований опубликованы в Украине и России.

#### **Основные публикации**

1. Бондаренко В.И., Власов С.Ф., Ткачук С.В. Выбор определяющих параметров струйного закрепления пород // Гидротехническое строительство. – 1993. – № 11. – С. 8-10.
2. Власов С.Ф. Теория и технология струйного закрепления пород // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1997. – № 7. – С. 4-5.
3. Власов С.Ф., Устивицкий О.А. Обоснование эффективности струйных способов закрепления дисперсных пород // Науковий вісник НГАУ. – 2000. – № 6. – С. 23-26.
4. Власов С.Ф., Тимченко С.Е. Влияние магнитного поля на некоторые физико-химические свойства цементных растворов, используемых при струйной технологии закрепления пород // Науковий вісник НГАУ. – 2001. – № 4. – С. 5-7.
5. Власов С.Ф., Садовенко И.А., Максимова-Гуляева Н.А. Обоснование возможности использования струйной технологии закрепления грунтовых склонов на основе анализа противооползневых мероприятий // Науковий вісник НГАУ. – 2002. – № 5. – С. 31-33.
6. Власов С.Ф., Тимченко С.Е., Рябичев В.Д. Интенсификация процессов струйного закрепления пород при магнитной обработке цементных растворов. – Луганск: Ятрань, 2005. – 128 с.
7. Ропай В.А., Власов С.Ф., Максимова-Гуляева Н.А. Математическая модель напряженно-деформированного состояния армированной цемента-лессовой противооползневой сваи // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 8. – С. 47-51.