Горная книга

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель	
Л.А. ПУЧКОВ	*президент МГГУ, чл.-корр. РАН*
Зам. председателя	
Л.Х. ГИТИС	*директор Издательства МГГУ*
Члены редсовета	
А.П. ДМИТРИЕВ	*академик РАЕН*
Б.А. КАРТОЗИЯ	*академик РАЕН*
А.В. КОРЧАК	*академик МАН ВШ*
М.В. КУРЛЕНЯ	*академик РАН*
В.Н. ОПАРИН	*чл.-корр. РАН, директор ИГД СО РАН*
В.И. ОСИПОВ	*академик РАН*
В.Л. ПЕТРОВ	*академик МАН ВШ*
А.Д. РУБАН	*чл.-корр. РАН, директор ИПКОН РАН*
Э.М. СОКОЛОВ	*академик МАН ВШ*
К.Н. ТРУБЕЦКОЙ	*академик РАН*
В.А. ЧАНТУРИЯ	*академик РАН*

Д.М. КАЗИКАЕВ
С.В. СЕРГЕЕВ

ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ

НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»
2011

УДК 622.833.5
ББК 33.14
К14

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253–03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (*ОСТ 29.124–94*). *Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.10*

Рецензенты:

- д-р техн. наук, проф., академик РАЕН, ведущий научный сотрудник ФГУП ВИОГЕМ *В.И. Стрельцов*;
- генеральный директор ООО «РусШахтСпецСтройПроект», канд. техн. наук *А.Д. Мишедченко*

Казикаев Д.М., Сергеев С.В.

К14 Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. — 244 с.: ил.

ISBN 978-5-98672-271-9 (в пер.)

Представлены методики, аппаратура и оборудование для натурных исследований напряженно-деформированного состояния околоствольных массивов горных пород и элементов крепи вертикальных шахтных стволов, сооружаемых и эксплуатируемых в сложных горно-геологических условиях. Изложены особенности подхода к решению научных задач, заключающиеся в системности и комплексности исследований. Изучаемые объекты рассмотрены как определенная совокупность, отражающая существующие и развивающиеся единые горно-геомеханические процессы при сооружении вертикальных стволов.

Для инженерно-технических работников рудников, шахтостроительных предприятий, проектных, конструкторских и научно-исследовательских организаций, может быть использована в учебном процессе горных вузов.

ISBN 978-5-98672-271-9

УДК 622.833.5
ББК 33.14

© Д.М. Казикаев, С.В. Сергеев, 2011
© Издательство «Горная книга», 2011
© Дизайн книги. Издательство «Горная книга», 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

В горно-добывающей промышленности наблюдается тенденция к увеличению глубины разработки полезных ископаемых в условиях ухудшения горно-геологических условий вскрытия. При этом повышаются требования к надежности крепи стволов. В настоящее время условия проходки и поддержания стволов подразделяют на обычные и сложные. Под этим подразумеваются главным образом условия проходки в зависимости от горно-геологической обстановки конкретного района [8].

Строительство вертикальных шахтных стволов является ответственным горно-строительным процессом, так как они служат главной транспортной, вентиляционной и коммуникационной магистралью, связывающей подземное и поверхностное пространства. От функционирования ствола зависят все работы по добыче полезных ископаемых

В зависимости от глубины, диаметра и типа крепи на сооружение шахтных стволов приходится до 50% времени и капитальных вложений, а стоимость крепления составляет до 60% стоимости его сооружения. Особенно велики затраты в тяжелых горно-геологических условиях, к которым относятся такие, когда выработки сооружаются способом замораживания. Этот способ применяется в условиях значительных обводнений месторождений полезных ископаемых. Примером одного из наиболее сложных является Яковлевское железорудное месторождение на Курской магнитной аномалии. Здесь рудное тело залегает под 600-метровой осадочной толщей, представленной главным образом малопрочными сыпучими и малосвязными породами, вмещающей 8 водоносных горизонтов с напором до 6 МПа. Близким по условиям залегания является Запорожское железорудное месторождение (ЗЖРК), где рудное тело залегает под 400-метровой осадочной обводненной толщей. Сложность сооружения таких стволов заключается в том, что вопросы низкотемпературного замораживания осадочных пород на больших глубинах исследованы мало. Поэтому проходка сопровождается

осложнениями, которые приводят к большим дополнительным затратам. Например, в Южном стволе ЗЖРК диаметром в свету 7 м серьезные затруднения при проходке были на глубинах 250–302 и 357–383 м [29]. В декабре 1965 г. ствол был сдан в эксплуатацию, а в марте 1966 г. при осмотре ствола обнаружены трещины в чугунных тюбингах на глубинах 292–296 и 311–313 м. Осложнения были отмечены и в стволах Яковлевского рудника КМА. Например, в стволе № 3 на глубине 345 м произошло разрушение крепи из чугунных тюбингов с толщиной спинки 70 мм. Устранить это удалось только за счет уменьшения диаметра крепи в районе аварии. Осложнения были почти во всех стволах, сооружаемых способом замораживания, глубиной более 300 м как в нашей стране, так и в Германии, Польше, Канаде, Голландии. Основной причиной такого положения следует считать отсутствие достаточных экспериментальных данных для создания методов прогноза напряженного состояния крепи в замороженных породах.

Особые условия работы крепи возникают в солях на глубинах свыше 300 м, где массив пород обладает значительной ползучестью. Например, бетонная крепь ствола «Главный» Калушского калийного рудника за 10 лет эксплуатации была разрушена полностью, при этом радиальные смещения крепи превысили 200 мм [67]. Разрушилась также крепь стволов Третьего Березниковского рудника на глубинах 435–470 м [85] и Закарпатского солерудника [108]. Некоторые интервалы вентиляционного ствола рудника «Пийло» Калушского калийного рудника перекреплялись трижды [51]. На первом этапе было предусмотрено бетонное крепление, которое разрушилось. Перекрепление производилось тюбингами с толщиной спинки 30 мм, а после их разрушения — тюбингами с толщиной спинки 70 мм. Осмотр вспомогательного ствола после 4-летней расконсервации показал, что ниже 350 м произошло полное разрушение крепи из тюбинговой колонны и бетона. Такое положение объясняется тем, что длительные натурные наблюдения в стволах, сооружаемых в соляных породах, не проводились. Методы прогноза нагрузок на крепь ствола основаны на физико-механических и реологических характеристиках соляных пород, определенных в лабораторных условиях, что не дает желаемых результатов.

В последнее время осваиваются глубокие месторождения, расположенные в региональных геологических нарушениях [12, 13]. К ним, в частности, относятся Донское месторождение хромитов и Талнахское месторождение медно-никелевых руд. Вопрос распределения естественных напряжений в зонах геологических нарушений исследуется многими научно-исследовательскими и учебными институтами. Сложность заключается в том, что методы прямых измерений напряжений в зонах дробления тектонических нарушений отсутствуют. Это возможно только косвенными методами. В настоящее время нет апробированных методов расчета нагрузок на крепь в таких условиях, а это приводит к несоответствию принятых параметров крепи фактическим радиальным нагрузкам. Из-за этого в 1984 г. произошло катастрофическое разрушение бетонной крепи клетевого ствола шахты «Центральная» Донского ГОКа в интервале глубин 572–765 м [12]. Ствол на высоту 193 м был засыпан породой. Проектом восстановления разрушенной части ствола и его дальнейшей проходки была принята комбинированная крепь из чугунных тюбингов и бетона. Осложнения возникли при сооружении рассечки на глубине 805 м, где было отмечено появление трещин в спинках тюбингов.

За последние десятилетия способы крепления стволов, материалы и конструкции крепи претерпели значительные изменения: наиболее распространенным материалом крепи был монолитный бетон, а с 1954 г. при сооружении вертикальных стволов стали применяться железобетонные тюбинги.

В настоящее время в сложных горно-геологических условиях повсеместно применяется комбинированная многослойная крепь, состоящая из чугунных тюбингов и слоя бетона. На Яковлевском руднике, в интервалах ствола с наибольшей ожидаемой нагрузкой, впервые применена крепь, состоящая из внешней и внутренней тюбинговых колонн и бетонного заполнения кольцевого пространства тюбингов. Внешняя колонна имела толщину спинки 70 мм и выполнялась из серого чугуна СЧ 21-40; внутренняя колонна — из тюбингов производства Польши с толщиной спинки от 100 до 120 мм или из высокопрочного чугуна ВЧ 2-50 с толщиной спинки 70 мм. Для

гидроизоляции между тюбингами внутренней колонны перед сборкой кольца укладывались свинцовые прокладки шириной 25 см и толщиной 4 мм. Сооружение такой крепи проводится в три этапа. На первом этапе на высоту 4–8 м возводится внешняя тюбинговая колонна; на втором — сверху вниз навешиваются тюбинги внутренней колонны, на третьем — проводится бетонирование кольцевого пространства между колоннами. Исследование напряженно-деформированного состояния таких сложных конструкций крепи не проводилось.

Еще одной сложной конструкцией является двухслойная бетон-бетонная крепь ствола. Такая крепь широко применяется в глубоких стволах рудников Норильского горнометаллургического комбината. Внешний слой бетона сооружается сверху вниз по мере проходки ствола и является передовым, а внутренний слой возводится снизу вверх. Здесь очень важен выбор величины заходки крепления передовым бетоном. Исследование напряженно-деформированного состояния таких конструкций крепи тоже не проводилось.

Анализ случаев разрушения крепи в стволах показывает, что в сложных горно-геологических условиях давление на крепь определяется не только гравитационными силами, но и другими действующими факторами. Наиболее надежная информация о состоянии крепи может быть получена только путем непосредственных экспериментальных определений. Сложность таких исследований в стволах заключается в недоступности участков наблюдений.

Известно, что в современной геомеханике в решении конкретных инженерных задач первоочередную роль играют натурные измерения. Это обусловлено прежде всего многообразием и изменчивостью горно-геологических условий, вариациями ведения и параметрами горных работ во времени и пространстве [10]. В этих условиях только достаточные по объему и систематические натурные измерения позволяют выяснить механизм изучаемых процессов, выделить доминирующие факторы среди многих действующих, установить наиболее важные параметры изучаемых процессов, необходимые для дальнейшего решения той или иной конкретной задачи. Натурные наблюдения поз-

воляют также обеспечить непрерывный контроль за состоянием крепи и своевременно выявлять возникновение опасных процессов.

В мировой практике исследования в стволах проводятся начиная с 50-х годов. В нашей стране натурными наблюдениями в основном занимался ВНИМИ, который в течение 20 лет проводил исследования на всех угольных и некоторых железорудных месторождениях. Основной задачей натурных исследований было установление фактических нагрузок на крепь стволов для использования их при выборе рациональной крепи. Исследования проводились на замерных станциях, установленных в наиболее характерных участках стволов. Величины нагрузок определялись с помощью специально разработанных динамометрических баллонов.

Основной объем настоящей монографии написан на базе уникального комплекса наблюдений и измерений напряженно-деформированного состояния крепи и околоствольного массива пород в периоды сооружения и эксплуатации вертикальных шахтных стволов Яковлевского рудника КМА, шахты «Центральная» Донского ГОКа, рудника «Пийло» концерна «Ориана», рудника «Скалистый» Норильского ГМК.

Анализируя состояние изученности проблемы и разрабатывая программу столь глубоких и масштабных исследований, исходили из положений о том, что механика твердого тела в целом, а также строительная механика и механика горных пород — наука экспериментально-аналитическая, а основы их — в значительной мере и эмпирические.

Вместе с тем указанный выше анализ выявил, что данные о действующих в реальных условиях усилиях на контуре подземных сооружений и напряженно-деформированном состоянии их элементов весьма скудны, разноречивы и слабо интерпретированы.

Поэтому, когда встал вопрос об освоении не имеющего в мировой практике аналогов по сложности горно-геологических и инженерно-геологических условий Яковлевского железорудного месторождения, была разработана и реализована широкомасштабная программа мониторинга и диагностики сооружаемых

методом предварительного замораживания массивов пород вертикальных шахтных стволов, охватывающая весь период строительства и последующей их эксплуатации.

Для наблюдения и измерений нагрузок и напряженно-деформированного состояния пород и крепи были отобраны самые современные на то время методики и технические средства, позволившие отследить механическое состояние околоствольного массива и элементов крепи стволов на всем их протяжении и в период всего строительства.

Созданная измерительная система позволяла держать под постоянным контролем состояние как всего сооружения в целом, так и отдельных его элементов и оперативно принимать технические решения при возникновении критических ситуаций.

Можно с уверенностью заметить, что успешное, практически безаварийное сооружение вертикальных стволов Яковлевского рудника в решающей мере было обеспечено благодаря организации наблюдений за напряженно-деформированным состоянием крепи, а само строительство стволов в подобных условиях стало достижением мирового уровня.

В настоящей работе изложены результаты исследований, выполненных под руководством д-ра техн. наук, проф. Д.М. Казикаева.

Раздел 4.3.3 написан совместно с д-ром техн. наук, проф. Н.С. Булычевым, раздел 3.5 — совместно с доц., канд. техн. наук А.Н. Красовским.

Все натурные наблюдения, осуществленные авторами, проводились при сотрудничестве со специалистами Проектной конторы треста «Шахтспецстрой», которые по разработкам ВИОГЕМ выполняли проекты замерных станций в стволах и корректировали параметры крепи. Авторы благодарны канд. техн. наук А.Д. Мишедченко, многолетнее сотрудничество с которым помогло при решении многих задач.

ГЛАВА 1 КРАТКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В КРЕПИ СТВОЛОВ

1.1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Существующие методы аналитических исследований геомеханических процессов и методы расчета крепи применительно к вертикальным стволам подробно и неоднократно проанализированы в литературе. Среди них можно выделить следующие:

1) методы, основанные на упрощенных гипотезах строительной механики;

2) методы, основанные на строгих законах теории упругости;

3) экспериментально-аналитические методы, основанные на аналитическом решении контактной задачи взаимодействия крепи с деформируемым массивом пород и использующие в качестве исходных данных результаты натурных измерений.

При расчете крепи стволов методами, относящимися к первой группе, многослойная крепь, состоящая из нескольких материалов с различными модулями упругости, рассматривается как криволинейный брус с приведенным к одному материалу сечением. К этой группе относятся методы Д. Даниэля, О. Домке, Ф. Мора, Ванслебена, Г. Линка, а также методы, принятые Шахтспецстроем и ВНИИОМШС [71].

Для проектирования крепей в Западной Европе применяется методика Г. Линка. По этой методике многослойная крепь с различными модулями упругости материалов рассматривается как криволинейный брус с приведенным к одному сечению материалом. Нагрузка на крепь принимается неравномерной, вида:

$$P = P_0 + P_2 \cos 2\theta. \qquad (1.1)$$

На основе методики Г. Линка разработана методика Шахтспецстроя (автор — А.Д. Мишедченко). Эта методика учитывает

действие на крепь давления тампонажа закрепного пространства. Выражение для определения наибольших тангенциальных напряжений на внутреннем контуре бетонного кольца при заданном давлении тампонажа:

$$\sigma_{\tau}^{\max} = \frac{1}{\eta^2 - 1}\left[2(P_{\text{осн}} + P_{\text{отн}})\eta^2 - (\eta^2 + 1)P_{\text{там}}\right] \le mR_{\tau}, \qquad (1.2)$$

где R_{τ} — расчетное сопротивление материала крепи растяжению; m — коэффициент условий работы; $\eta = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{вн}}}$; $P_{\text{осн}} = P_w + P_{\text{д}}$; $P_{\text{там}}$ — давление тампонажного раствора; $r_{\text{н}}$, $r_{\text{вн}}$ — радиусы наружного и внутреннего контура сечения крепи соответственно.

Расчет чугунной тюбинговой крепи на давление контрольного тампонажа включает следующие этапы:

1. Определение разрушающей нагрузки контрольного тампонажа, т.е. верхнего критического значения нагрузки.

2. Определение напряженного состояния тюбингового кольца при заданных деформациях и расчетной величине нагрузки давления контрольного тампонажа.

А.Д. Мишедченко была проведена оценка величины напряжений в крепи вследствие ползучести бетона, при этом получены следующие выражения:

$$\sigma_{\text{бет}}^{\text{п}} = \left(\frac{N_{\text{б}}^{\text{п}}}{F_{\sigma}} + \frac{M_{\sigma}^{\text{п}}}{J_{\sigma}} Z\right)\frac{R_{\sigma 0}}{R}, \qquad (1.3)$$

$$\sigma_{\tau}^{\text{п}} = \left(\frac{N_{\tau}^{\text{п}}}{F_{\tau}} + \frac{M_{\tau}^{\text{п}}}{J_{\sigma}} Z\right)\frac{R_{\tau\sigma}}{R},$$

где $\sigma_{\text{бет}}^{n}, \sigma_{\tau}^{n}$ — тангенциальные напряжения в тюбингах и бетоне от влияния деформаций ползучести; $N_{\sigma}^{\text{п}}$, $M_{\sigma}^{\text{п}}$, $N_{\tau}^{\text{п}}$, $M_{\tau}^{\text{п}}$ — дополнительные усилия в бетоне и тюбингах, вызванные ползучестью бетона; $F_{\text{б}}$, F_{τ}, J_{σ}, J_{τ} — площади и моменты инерции рассматриваемых частей сечения крепи; $R_{\sigma\text{о}}$, $R_{\tau\text{о}}$ — радиусы нейтральных осей слоев крепи; R — радиус наружного контура сечения крепи.

По методике Шахтспецстроя крепь рассматривается при воздействии трех различных комбинаций нагрузок, включающих

нагрузки от горного давления, гидростатического давления и давления тампонажного раствора, нагнетаемого за чугунную тюбинговую крепь.

К методикам расчета многослойной крепи, основанным на строгих законах теории упругости, относятся методики Г.М. Саркисова, М.В. Самойловского, М. Худека, А.А. Шубина, А.М. Козела и др. [121, 125, 56].

При расчете по этим методикам многослойная крепь рассматривается как составная труба. Контактные давления слоев крепи друг на друга находят из условия равенства радиальных и тангенциальных перемещений контактирующих поверхностей.

А.М. Козел в работах [56, 57, 58] рассмотрел напряженно-деформированное состояние многослойной крепи под действием неравномерной нагрузки. Пользуясь методом функции напряжений, он составил систему уравнений для нахождения коэффициентов, входящих в эту функцию для каждого слоя. Формулы для определения напряжений в произвольном слое крепи имеют следующий вид:

$$\sigma_\tau = P_{0(\text{в})} - P_{2(\text{в})} \cos 2\varphi,$$

$$\sigma_\varphi = \left[2P_{0(\text{а})} + P_{0(\text{в})}(m+1)\right]/(m-1) + (\cos 2\varphi/(m-1)^2 \times$$

$$\times\left[4P_{2(\text{а})}(m+1) - P_{2(\text{в})}(m^2+6m+1) + 4mt_\text{а} + 2t_\text{в}(2m-m^2+1)\right], \quad (1.4)$$

$$\tau_{\tau\varphi} = -t_\text{в} \cos 2\varphi; \;\; m = (в/a)^2,$$

где $t_\text{а}$, $t_\text{в}$ — контактные касательные усилия на внешнем и внутреннем контурах слоя; $P_{0(\text{а})}$, $P_{0(\text{в})}$, $P_{2(\text{а})}$, $P_{2(\text{в})}$ — равномерная и неравномерная части нагрузок на контактах слоев соответственно.

В научно-исследовательском центре шахтного строительства Польши (ВИДОКОР) был разработан метод расчета многослойной крепи без периодических неоднородностей. Принято, что при малых нагрузках материалы слоев ведут себя как упругие тела, а при нагрузках, приближающихся к пределу прочности, конструкции принимаются упругопластическими либо жесткопластическими.

В настоящее время распространение получил комплексный метод расчета многослойной крепи, предложенный Н.С. Булычевым [8, 9, 10].

Многослойная комбинированная крепь ствола рассматривается как многослойное кольцо, склеенное из упругих слоев. Рассмотрим случай равномерной нагрузки, так как это упрощает формулы и позволяет продемонстрировать принципы расчета. Взаимодействие между слоями представляется как последовательная «передача» нагрузок от внешних слоев к внутренним. Напряжения на контактах произвольного i-го слоя определяются из выражения (рис. 1.1):

$$P_{0(i-1)} = P_{0(i)}\, K_{0(i)}, \tag{1.5}$$

$$P_{0(i-2)} = P_{0(i)} K_{0(i)}\, K_{0(i-1)},$$

где $P_{0(i)}$ — нагрузка на слой i; $P_{0(i-1)}$ — то же на слой i–1; $P_{0(i-2)}$ — то же на слой i–2; $K_{0(i)}$ — коэффициент передачи нагрузок через слой i на i–1; $K_{0(i-1)}$ — то же через i–1 на i–2.

Вычисление коэффициентов передачи нагрузок от слоя к слою производится по условию непрерывности смещений на

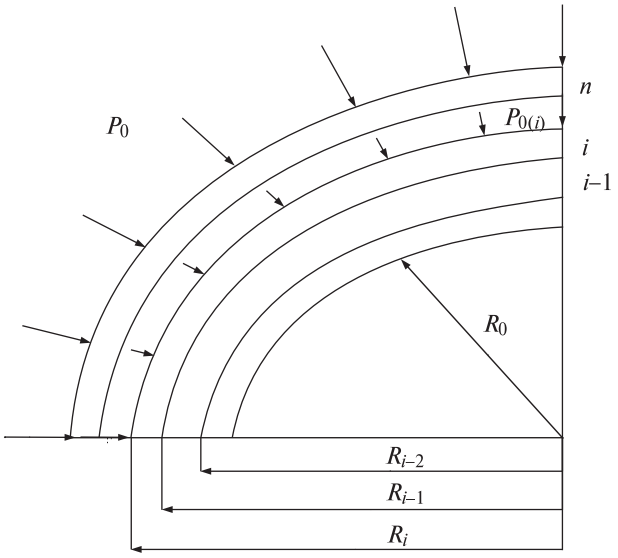

Рис. 1.1. Расчетная схема многослойной крепи по методу проф. Н.С. Булычева

контакте двух смежных слоев: $U_{0(i)} = U_{0(i-1)}$. Выражения для определения этих коэффициентов являются рекуррентными (возвратными), так как коэффициент передачи нагрузок через i-й слой выражается через соответствующие коэффициенты для $i-1$ слоя. Коэффициент передачи через i-й слой определится:

$$K_{0(i)} = \frac{d_{1(i)}}{d_{2(i)} + f_{(i)}(d_{1(i-1)} - K_{0(i-1)} d_{2(2)})}, \tag{1.6}$$

где

$$d_{1(i)} = C_i^{\,2}(\chi - 1), \; C_i = R_i / R_{i-1};$$

$$d_{2(i)} = 2C_i^{\,2} + \chi - 1, \; \chi_i = 3 - 4_{\mu i};$$

$$d'_{1(i-1)} = C^2{}_{i-1}(\chi_{i-1} - 1)2, \; \chi_{i-1} = 3 - 4_{\mu-1};$$

$$d'_{1(i-1)} = \chi_{i-1} + 1, \; G_i = K_i / (1 + \mu_i)2;$$

$$f_1 = \frac{G_1 ... C_1 - 1}{G_{i-1} C^2{}_{i-1} - 1};$$

R_i, R_{i-1} — внешний и внутренний радиусы слоя i; μ_i, μ_{i-1} — коэффициенты Пуассона материалов слоев; E_i, E_{i-1} — модули упругости материалов слоев.

Таким образом, указанный метод расчета освобождает от необходимости решения систем уравнений. Напряжения на всех контактах слоев определяются по формулам (1.6)–(1.7) путем последовательного применения индекса i.

При известных контактных напряжениях $P_{0(i)}$, $P_{0(i-1)}$ вычисляются тангенциальные нормальные напряжения на внутреннем и внешнем контурах сечения каждого слоя:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_\theta \big| z = R_i &= P_{0(i)}\, m'_{1(i)} - P_{0(i-1)}\, m'_{2(i)}; \\ \sigma_\theta \big| z = R_{i-1} &= P_{0(i)}\, m_{1(i)} - P_{0(i-1)}\, m_{2(i)}; \end{aligned}\right\} \tag{1.7}$$

где

$$m_{1(i)} = 2C_i^2 / (C_i^2 - 1); \quad m_{2(i)} = (C_i^2 + 1) / (C_i^2 - 1);$$

$$m'_{2(i)} = 2 / (C_i^2 - 1); \quad m'_{1(i)} = m_{2(i)}.$$

Если многослойная крепь содержит неоднородные слои с различными упругими характеристиками (например, ребра жесткости тюбингов), то расчет крепи производится следующим образом. Для определения коэффициентов передачи нагрузок неоднородные слои рассматриваются как квазиоднородные с приведенным модулем сдвига:

$$\overline{G} = \frac{G_{\text{а}} - a + G_{\text{в}}\, в}{a + в}, \tag{1.8}$$

где $G_{\text{а}}$, $G_{\text{в}}$ — модули сдвига ребра чугунного тюбинга и межреберного заполнения (бетона); a, $в$ — высоты ребра и межреберного заполнения.

Метод проф. Н.С. Булычева является на сегодняшний день универсальным. Он позволяет вести расчет при произвольном количестве слоев крепи с любыми периодическими неоднородностями (например, арматурой в железобетонном слое). Расчет возможен при любой степени неравномерности внешних нагрузок, а также при потере связи между слоями от гидравлического напора. При проходке ствола под защитой ледопородного ограждения метод позволяет учитывать взаимодействие ЛПЦ с многослойной крепью.

Сопоставление методов расчета крепи, основанных на методах строительной механики и методах теории упругости, показало, что первые, в силу принятых упрощающих гипотез и допущений (представление крепи в виде криволинейного бруса приведенного сечения и др.), в ряде случаев существенно искажают картину напряженно-деформированного состояния крепи.

Развитие экспериментально-аналитических методов расчета связано с натурными наблюдениями в стволах. Большую роль в их развитии сыграли исследования, выполненные во ВНИМИ [62–65 и др.]. Экспериментально-аналитические методы расчета крепи являются обратными по отношению к обычным методам и могут быть основаны как на методах строительной механики, так и на методах теории упругости.

Первый экспериментально-аналитический метод был разработан Н.С. Булычевым, А.М. Козелом, Г.А. Крупенниковым

и Н.А. Филатовым (руководитель работ Г.А. Крупенников) и включал статистический анализ результатов измерений, их представления в виде расчетной эпюры нагрузок на крепь и расчет крепи при известных (измеренных) нормальных напряжениях и неизвестных, получаемых только в процессе расчета касательных напряжений.

Одновременно с ВНИМИ под руководством К.В. Руппенейта В.А. Лыткиным, М.А. Долгих, А.Н. Драновским был рассмотрен случай расчета крепи по заданной (полученной путем замеров) эпюре радиальных нагрузок на крепь выработки круглого сечения.

В работах В.И. Шейнина рассмотрен расчет крепи горных выработок круглого поперечного сечения по результатам замеров нормальных нагрузок с использованием методов математической статистики [120].

А. Вихуром приводится методика расчета крепи шахтных стволов применительно к результатам натурных измерений, полученных ВНИМИ [15].

Экспериментально-аналитический метод расчета крепи выработок произвольного сечения при заданной эпюре (измеренных) нормальных напряжений на контакте крепи с массивом, предусматривающий определение касательных контактных напряжений, как реакции упругих опор, направленных по касательной к внешнему контуру поперечного сечения крепи, был предложен Н.С. Булычевым, Б.З. Амусиным и А.Г. Оловянным [14].

Н.С. Булычевым и Н.И. Фотиевой предложен экспериментально-аналитический метод расчета монолитной крепи произвольного сечения по измеренным нормальным напряжениям на контакте. Суть данного метода заключается в том, что расчет крепи по данным натурных измерений производится на основе обратного решения плоской контактной задачи теории упругости о равновесии кольца произвольной формы, подкрепляющего отверстие в линейно деформируемой среде с другими деформационными характеристиками.

И.И. Савиным разработан экспериментально-аналитический метод расчета многослойной крепи выработок круглого сечения [99]. Метод предполагает расчет крепи по результатам

измерений контактных радиальных напряжений, нормальных тангенциальных напряжений, радиальных перемещений (конвергенции) точек внутреннего контура крепи. Метод основан на общем методе расчета многослойных систем, разработанном Н.С. Булычевым. Получены выражения для определения характеристик начального гравитационного и тектонического полей напряжений. Характеристики начального поля напряжений, получаемые в результате обработки данных натурных измерений, не зависят от конструкции крепи, в которой производились измерения и поэтому могут быть использованы при расчете крепи другой конструкции в аналогичных условиях.

Сравнение экспериментально-аналитических методов показывает, что методы, основанные на теории упругости, позволяют производить более точный расчет крепи.

Для сложных горно-геологических условий сооружения стволов актуальным является прогноз величин нагрузок на крепь стволов шахт. В работе [10] приводится анализ взаимодействия крепи и массива пород. Например, для реологической модели массива, представленной моделью Максвелла, давление на крепь описывается выражением:

$$P = \gamma H \left[1 - \exp\left(-\frac{G_0}{\eta_0} \frac{Br_0}{Br_0 + 2G_0} t\right) \right], \tag{1.9}$$

где G_0, G — модули сдвига крепи и массива; B — жесткость крепи; η — реологическая характеристика массива.

Для массива, представленного реологической моделью Кельвина, при $t \to \infty$:

$$P = \frac{Br_0}{Br_0 + 2G_0}. \tag{1.10}$$

Проф. А.Г. Протосеня предложил методику расчета нагрузок на крепь стволов, сооружаемых в пластичных породах (глина, соль). Поведение горных пород описывается уравнениями нелинейной ползучести в форме теории старения. В качестве основного принято условие совместности перемещений системы «крепь–порода». Уравнение для определения нагрузки имеет вид:

$$Br_n^a \left[\frac{\alpha(\lambda \gamma H + K \operatorname{ctg}\rho)}{2 + (1+m)\alpha} \right]^{m+1} =$$

$$= \frac{pe^{pt}}{4G_2(C_2^2 - 1)} \left[2 + G_2^2(\chi_1 - 1) - K_{\text{п}}^{(1)}(1 + \chi_2) \right], \qquad (1.11)$$

где B, m — коэффициенты аппроксимации, являющиеся константами для фиксированных моментов времени:

$$C_2 = R_2/R_1; \quad \chi_2 = 3 - 4\nu_2;$$

$$A = 2\sin\rho/1 - \sin\rho,$$

$r_{\text{п}}^a$ — радиус зоны предельных равновесий; $K_{\text{п}}^{(1)}$ — коэффициент передачи нагрузок; G_2 — модуль сдвига пород; P — радиальное давление на крепь.

Для расчета применяются реологические и деформационные характеристики пород, определенные лабораторным способом.

А.А. Репко предложил способ определения нагрузок на крепь в породах, склонных к ползучести. Сущность предлагаемого способа состоит в использовании обобщенного критерия подобия механизма взаимодействия системы «крепь — вмещающая порода», полученного на основании анализа контактных упругопластических задач. Установленный критерий подобия инвариантен относительно глубины, диаметра ствола и физико-механических свойств пород.

А.Г. Протосеня, А.М. Козел, В.А. Борисов и др. предложили методику расчета нагрузок на крепь глубоких стволов, сооружаемых в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях [97].

Массив пород представляется как плоскость, в которой образовано круглое отверстие. Состояние массива предполагается упругим, а при существенных касательных напряжениях он пластически деформируется с проявлением неупругого разрыхления.

В результате аналитических решений получены уравнения взаимодействия многослойных крепей с массивом пород, из которых определяются величины радиальных нагрузок на крепь.

Анализ показывает, что методы прогноза нагрузок на крепь стволов, сооружаемых замораживанием, и стволов, сооружаемых в тектонически нарушенных породах, не разработаны. Методы расчета нагрузок на крепь стволов, сооружаемых в соляных породах, требуют экспериментальной апробации.

1.2. МЕТОДЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Систематические натурные исследования в шахтных стволах начали проводиться в начале 50-х годов прошлого столетия. Трудность их заключается в том, что после отхода забоя от места наблюдений замеры возможны только при наличии надежной дистанционной аппаратуры. Натурные наблюдения в стволах сложны по организации и трудоемки при выполнении.

Существуют два направления натурных измерений: непосредственные и косвенные. К первой группе относятся методы, с помощью которых измеряется непосредственная искомая величина, т.е. нагрузка.

Метод измерения нагрузок на крепь развивался главным образом в нашей стране. Вначале измерения проводились с использованием одиночных динамометров. Первые измерения нагрузок на крепь стволов в 1950–1951 гг. проведены Б.В. Матвеевым и А.А. Ардишвили (ВНИМИ) на Ахалцихском буроугольном месторождении [62]. Были установлены три замерные станции, оснащенные восемью динамометрами каждая, встроенными в крепь с внешней стороны.

В 1954–1955 гг. в вертикальных стволах того же месторождения были проведены натурные наблюдения А.Т. Тополкароевым [111].

В 1955 г. А.М. Янчур провел измерения давления на крепь стволов шахты «Щегловка — Глубокая» в Донбассе [124]. Для измерений были приняты индуктивные динамометры конструкции МАКНИИ. Были размещены три замерные станции. Датчики устанавливались в специальном щите, снабженном винтовыми домкратами для предварительного поджатия динамометров к породной стене.

Систематические наблюдения в шахтных стволах начали проводиться институтом ВНИМИ под руководством Г.А. Кру-

пенникова (Булычев Н.С., Димов А.И., Дробышев В.Ф., Козел А.М., Филатов И.А. и др.) с 1957 г. в Донецком и Львово-Волынском бассейнах. Основной задачей натурных исследований было установление фактических нагрузок на крепь стволов в различных условиях для использования их при выборе рациональной крепи. Измерения нагрузок на крепь проводились с помощью специальной динамометрической крепи, составной частью которой являлись динамометрические баллоны.

Динамометрический баллон представляет собой металлическую сварную коробку с гибкой мембраной, которая заполняется жидким битумом или трансформаторным маслом [65]. Он прочно закрепляется на внешней поверхности крепи ствола. Участок ствола, закрепленный такой крепью, представляет собой динамометрическую станцию. Для измерения давления жидкости в баллонах применялись струнные манометры Д-51 и ГД-33, в качестве регистрирующих устройств — струнные станции ВЧС-2, ССМ. Всего было установлено 16 замерных станций.

В 1963–1968 гг. ВНИМИ под руководством В.Ф. Дробышева проводились натурные исследования в Южном и Северном стволах Запорожского железорудного комбината № 1 (ЗЖРК-1), сооружаемых способом замораживания пород. Цель — получение исходных данных для проектирования рациональных конструкций крепи. Стволы диаметром в свету 6,0 м и глубиной 435 м закреплены двухслойной комбинированной крепью из чугунных тюбингов с толщиной спинки 40–60 мм и бетона марки 200 толщиной 400–750 м [29].

Комплект аппаратуры замерной станции ВНИМИ включал в себя (рис. 1.2) динамометрическую крепь со струнными манометрами 2ДЗЗ, гидростатические динамометры, накладные струнные тензометры 2Д54, струнные телетензометры конструкции ВНИИГ; отдельные тюбинги оснащались фотоупругими датчиками для измерения напряжений в спинке и ребрах жесткости тюбингов. Динамометрическая крепь Р-1151-30, сконструированная Проектной конторой треста «Шахтспецстрой», представляет собой сборное кольцо с наружным диаметром 7,5 м и высотой 1,0 м и состоит из 12 несущих сегментов с

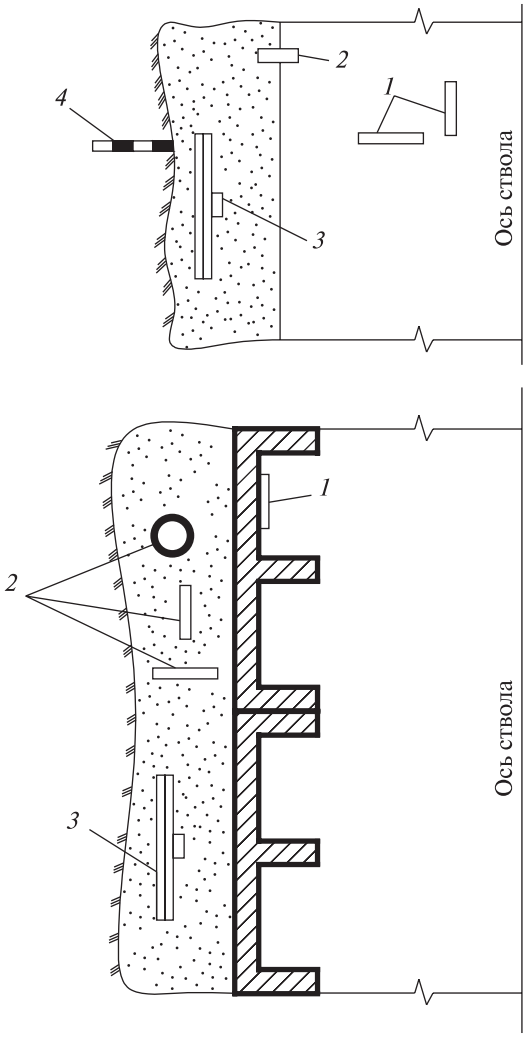

Рис. 1.2. Схема динамометрической станции ВНИМИ в стволах ЗЖРК-1:
1 — фотоупругие датчики; *2* — деформометры в бетоне;
3 — динамометрический баллон

динамометрическими баллонами (по два баллона на каждый сегмент), наполненными незамерзающим трансформаторным маслом, несущие сегменты представляют собой стальные листы высотой 1,0 м, толщиной 10 мм, изогнутые по радиусу ствола в

проходке и усиленные швеллером № 14. Баллоны монтируются из двух тонких стальных листов (поддона и крышки) толщиной 3 мм, стягиваемых винтами М 8 в пакет через проложенную по периметру прокладку из мягкой маслостойкой резины. Толщина слоя масла, заливаемого между поддоном и крышкой баллона, составляет 40 мм. К поддону приварен фланец для установки динамометра 2ДЗЗ, регистрирующего изменение давления масла под действием нагрузки со стороны вмещающих пород.

Большинство измерительной аппаратуры ВНИМИ конструировалось, изготавливалось и испытывалось по ходу проведения исследований и монтажа замерных станций, поэтому замерные станции оснащались в основном динамометрическими баллонами измерения величин нагрузок на крепь. Измерения деформаций телетензометрами и напряжений оптически активным методом завершились неудачно. Также были проведены измерения температурного режима пород. В Южном и Северном вентиляционных стволах оборудовано 6 замерных станций.

С 1964 г. ВНИМИ проводил исследования проявлений горного давления в стволах, проходимых способом бурения (руководитель Н.С. Булычев). Наблюдения проводились в стволах шахты № 31 комбината «Карагандауголь». Замерные станции были оборудованы динамометрическими баллонами. Продолжительность наблюдений составила 6 месяцев.

Таким образом, ВНИМИ разработаны методика и аппаратура для определения нагрузок на крепь стволов и проведены исследования взаимодействия крепи ствола с массивом пород при различных способах проходки, в разных горно-геологических условиях.

Санкт-Петербургским горным институтом начиная с 1972 г. проводились натурные наблюдения за проявлениями горного давления в глубоких стволах рудника «Октябрьский» Норильского горно-обогатительного комбината [83, 91]. Замерные станции оборудованы динамометрическими баллонами конструкции ВНИМИ, глубинными реперами конструкции ЛГИ. Проводился пневмокаротаж трещиноватого массива околоствольных пород и лабораторные испытания физико-механических свойств горных пород и материалов крепи.

Второе направление натурных экспериментальных исследований заключается в измерении напряжений и деформаций крепи. По напряжениям производится расчет величин нагрузок на крепь. Этот метод широкое распространение получил за рубежом.

В Японии в 1952–1954 гг. напряжения в крепи измерялись с помощью фотоупругих датчиков [202, 258, 260]. При креплении ствола на внутренней поверхности крепи устанавливались кольцевые оптические датчики, деформирующиеся совместно с крепью. В стволе шахты «Хапусима» на глубинах 22, 26, 82 м было установлено в крепь по четыре датчика. На шахте «Игари» фотоупругие датчики были установлены в районе сопряжения ствола на глубине 600 м. Измерение напряжений в крепи центрального ствола шахты компании «Хомбэцу Коге» производились таким же методом. Крепь ствола представляла собой комбинацию бетонных блоков разной прочности. Внешние блоки — пустотелые, имели невысокую прочность (5,5 МПа) и предназначались для создания податливости крепи. Внутренний слой имел прочность около 40 МПа и являлся несущим. Фотоупругие датчики располагались во внутреннем слое через каждые 10 м глубины.

В 1957 г. Горный научно-исследовательский центр в Англии разработал методику и аппаратуру для измерения деформаций крепи шахтных стволов [131]. Был разработан струнный деформометр и измерительная станция. Для предотвращения повреждения деформометра при установке его помещали в своеобразный защитный кожух из бетона. Такие датчики устанавливались попарно вблизи внутренней и внешней поверхностей крепи в точках, где ожидались наибольшие величины деформаций. Измеренные деформации бетонной крепи пересчитывались в напряжения, при этом исключались деформации ползучести. Исследования по этой методике выполнены в стволе «Абернант» на глубине 730 м в аргиллитах.

В Германии на Западно-Германских угольных разработках проводились натурные наблюдения в стволах Капеллен, Рейнпросен 9, Россенрау, Лоберг 3, сооружаемых способом замораживания, глубинами 400–450 м, диаметрами в свету 6,5 м [127,