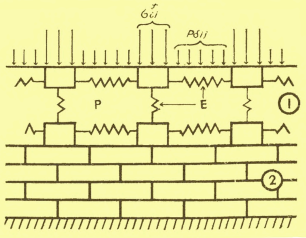
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ОСУШЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



БЕЛГОРОД 1978

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СССР
СОЮЗРУДА

Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу
ВИОГЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ОСУШЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Белгород 1978

УДК 622.52:622.83

В работе в самом общем виде приведены гидрогеологические и физико-механические особенности толщи осадочных пород разведанных железорудных месторождений КМА, необходимые для составления схем фильтрации и деформации при проведении дренажных работ в нижнем комплексе водоносных пород в период освоения этих месторождений. Излагаются основные положения теории деформирования водонасыщенных пород при изменении напоров подземных вод. Подробно рассматривается вопрос моделирования на сеточных электроинтеграторах перемещений водонасыщенных пластов и перекрывающих их пород под влиянием водопонижения.

На конкретном примере Яковлевского железорудного месторождения КМА иллюстрируется применение изложенной методики электромоделирования перемещений толщи осадочных пород и оседания дневной поверхности под влиянием дренажных работ в известняках карбона на период строительства рудника.

Методические рекомендации предназначены для специалистов, занимающихся проектированием горнорудных предприятий в сложных гидрогеологических условиях. Утверждены научно-техническим советом института ВИОГЕМ в качестве методических рекомендаций.

© Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, специальным горным работам, рудничной геологии и маркшейдерскому делу (ВИОГЕМ), 1978.

ВВЕДЕНИЕ

Разведанные и намечаемые к разработке месторождения богатых руд КМА (Яковлевское, Гостищевское, Висловское, Больше-Троицкое, Ольховатское) характеризуются сложными гидрогеологическими условиями. Эта сложность определяется тем, что над рудным телом залегает комплекс осадочных неустойчивых пород, содержащих до семи водоносных горизонтов и имеющих между собой либо прямую гидравлическую связь, или же эта связь осуществляется через глинистые, так называемые разделительные, слабопроницаемые слои (перемычки). Глинистые слои обычно характеризуются высокой пористостью, а следовательно, значительной сжимаемостью при изменении эффективных давлений и большими объемами воды, часть которых высвобождается и восполняет запасы основных водоносных горизонтов при водоотборах.

Сжимаемость глинистых пород, контактирующих с основными водоносными горизонтами, проявляется в основном, как показал опыт строительства Запорожского железорудного комбината № 1 на Южно-Белозерском месторождении, при проведении строительного водопонижения в высоконапорных водоносных пластах. В этот период под влиянием водопонизительных и дренажных работ на осваиваемых месторождениях железных руд, помимо прочих нежелательных явлений, сопровождающих дренажные работы, происходит уплотнение глинистых пород кровли и почвы основных водоносных горизонтов, в которых происходит интенсивное снижение напоров подземных вод, а вслед за ним и оседание дневной поверхности. При этом происходят деформации крепи шахтных стволов и смещение их оси от первоначального положения. В то же время при оседании и сдвижении поверхности нарушается устойчивость фундаментов надшахтных зданий и сооружений, подземных машин, в мировой практике отмечены даже случаи деформации железнодорожных путей и автодорог.

Так, например, под влиянием строительного водопонижения на Южно-Белозерском месторождении дневная по-

верхность и вся перекрывающая рудное тело толща пород претерпевала значительные деформации как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Вертикальные смещения при этом составили около 2,5 м, а горизонтальные - до 0,3 м.

Для разработки способов защиты строительных конструкций (крепи шахтных стволов, фундаментов надшахтных зданий и сооружений и др.) от деформаций возникает необходимость в разработке методов прогноза деформаций водоносных пород, оседания и сдвижения поверхности земли под влиянием дренажных работ при строительстве и эксплуатации горных предприятий в районе КМА.

Необходимо отметить, что при сооружении горных выработок, например, шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях их деформация происходит под влиянием дополнительных напряжений в горном массиве, возникающих за счет

нарушения равновесного состояния горного массива проводимой выработкой-стволом;

изменения агрегатного состояния пород при их замораживании, а затем оттаивании;

уменьшения гидростатического давления под влиянием дренажных работ и увеличения в связи с этим давления со стороны кровли на скелет водонасыщенного пласта, выражающегося в сжатии всей породы в целом;

работ, связанных с проходкой ствола: разработкой породы и ее удалением.

Учет каждого из перечисленных факторов представляет самостоятельную задачу, хотя действие их проявляется в одном направлении - они обусловливают общую деформацию горной выработки.

В настоящей работе излагается методика электромоделирования на сеточных интеграторах деформаций массива горных пород под влиянием изменения напора в водонасыщенных пластах при проведении дренажных работ на месторождениях железных руд КМА в период их освоения.

Отдельные разделы написаны: введение, 2.1, 2.2.4 - В.М.Чуйко; 1 - С.И.Косяковым и В.М.Чуйко; 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.2.4 - А.В.Зубовой и В.М.Чуйко; 3 - Т.П. Забалуевой и В.М.Чуйко.

1. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ ПОРОД ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КМА

Для месторождений КМА, в том числе Яковлевского, Гостищевского, Висловского, Ольховатского и Больше-Троицкого, в гидрогеологическом отношении характерна этажная система залегания водоносных пластов, разделенных слабопроницаемыми глинистыми слоями, через которые происходит гидравлическая взаимосвязь между водоносными горизонтами в разрезе. Поэтому при освоении этих месторождений под влиянием водопонизительных работ, проводимых в отдельных водоносных пластах, например, руднокристаллическом и нижнекаменноугольном, в силу гидравлической взаимосвязи, будет происходить некоторое снижение напоров и в смежных с ними горизонтах. Таким образом, на месторождениях КМА процесс снижения напоров, а следовательно, и развития деформаций даже при локальных водоотборах может охватить целые комплексы водоносных пород.

Гидрогеологические условия перечисленных выше железорудных месторождений КМА качественно весьма схожи, хотя количественные характеристики напоров, коэффициентов фильтрации, сжимаемости и других парамет-ров, конечно, разные. На этих месторождениях распространены следующие основные водоносные горизонты: маастрихт-туронский, сеноман-альбский, келловей-батский, нижнекаменноугольный. При вскрытии и отработке на этих месторождениях рудной залежи с заклад кой выработанного пространства дренажные мероприятия будут производиться только в нижнекаменноугольном и нижнепротерозойском водоносных горизонтах, так что понижение напоров будет происходить только в этих и, возможно за счет перетекания, в келловей-батском горизонтах.

В связи с этим ниже приведена характеристика только

нижнепротерозойского, нижнекаменноугольного и келловей-батского водоносных горизонтов, принимающих участие в геологическом разрезе Яковлевского, Гостищевского, Висловского, Ольховатского и Больше-Троицкого железорудных месторождений КМА.

Нижнепротерозойский (руднокристаллический) (Pt_1) водоносный горизонт имеет повсеместное распространение и приурочен к верхней трещиноватой зоне докембрийских пород, представленных бокситами, железными рудами, сланцами и кварцитами. Его средняя мощность 60–70 м. Водообильность руднокристаллических образований незначительна. Коэффициент фильтрации этих пород изменяется в широких пределах: от 0,004 до 0,57 м/сут, при среднем значении 0,13 м/сут. Коэффициент пьезопроводности $a = (1,0-3,3)\ 10^6 м^2/сут$.

Нижнепротерозойский водоносный горизонт гидравлически связан с вышележащим нижнекаменноугольным. Прямая гидравлическая связь между этими горизонтами имеет место на ограниченных по площади участках непосредственного контакта водоносных известняков с рудным телом. На преобладающей же площади района эта взаимосвязь затруднена из-за наличия в кровле докембрийских пород продуктов их выветривания – каолинов. Мощность каолиновых глин достигает 10–15 м, а коэффициент сжатия $a_к = 4,3 \cdot 10^{-5} м^2/т$.

Нижнекаменноугольный водоносный горизонт (C_1^{vis}) наиболее водообилен среди других нижней толщи осадочных пород. Он приурочен к трещиноватым и закарстованным известнякам, для которых характерно наличие в разрезе (преимущественно в нижней его части) прослоев сланцев и глин. Северная граница горизонта проходит примерно в 40 км от Яковлевского месторождения, а к югу от нее каменноугольный водоносный горизонт распространен повсеместно. Мощность его увеличивается с севера на юг от 35 до 180 м. Величина гидростатического напора над кровлей известняков изменяется от 400 до 500 м. Водообильность известняков на месторождении изменяется в ши-

роких пределах, а коэффициент фильтрации – от 0,2 до 5,0 м/сут. Коэффициент пьезопроводности изменяется от $5,7 \cdot 10^4$ до $8,3 \cdot 10^6 м^2$/сут. Известняки карбона слабо-сжимаемые $a_к = 2,8 \cdot 10^{-6} м^2/т$.

Келловей-батский водоносный горизонт (J_{2-3}^{bt+cl}) представлен песками с многочисленными маломощными прослоями песчаников и реже – глин, развитых преимущественно в нижней части. Мощность горизонта 30-45 м, напор над кровлей достигает 330-370 м. Келловейские пески сравнительно однородны и характеризуются коэффициентами проводимости и пьезопроводности, равными соответственно $km = 14,2 м^2$/сут и $a = (1,1-3,0)\ 10^5 м^2$/сут. Пески слабосжимаемые $a_к = 6,44 \cdot 10^{-6} м^2/т$.

В кровле келловей-батского водоносного горизонта залегают юрские глины киммеридж-оксфорда мощностью 40-50 м, представленные плотными известковистыми разностями. В толще глин часто встречаются 0,5-1,5-метровые линзообразно залегающие прослои известняков и песчаников. Плотные монолитные глины киммеридж-оксфорда характеризуются малой естественной влажностью, не превышающей обычно 16-18%, пористостью, равной 37-42%, большой уплотненностью и являются надежным водоупором, отделяющим водоносные горизонты верхней осадочной толщи от нижней.

В почве келловей-батского водоносного горизонта залегают глины бат-байоса мощностью до 35 м, характерной особенностью которых является наличие прослоев песчаных пород, образующих локальные водоносные горизонты. Коэффициент фильтрации глин бат-байоса $K = 5 \cdot 10^{-6}$ м/сут, коэффициент сжатия $a_к = 3 \cdot 10^{-5} м^2/т$.

Слабопроницаемая толща глин бат-байоса разделяет келловей-батский и нижнекаменноугольный водоносные горизонты. По данным опытно-производственного водопонижения, проведенного на Яковлевском железорудном месторождении в известняках карбона было установлено, что глины бат-байоса характеризуются начальным градиентом фильтрации $i_0 = 4,2$.

Схема деформирования нижнего комплекса водонос-

ных пород при снижении напорных уровней в общем случае будет пятислойной. Здесь при водоотборах испытывают деформации сжатия выветрелые породы (каолины) докембрийских образований, известняки карбона, глины бат-байоса и пески келловея, а также без отжатия поровых вод вся остальная вышележащая толща осадочных пород, залегающая в кровле келловей-батского водоносного горизонта. Такая схема деформирования пород не может быть решена аналитическими методами. Для многослойных систем наиболее перспективными являются методы расчета, базирующиеся на использовании АВМ и ЭЦВМ.

2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПОРОД И ОСЕДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ПОНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Под влиянием изменения напоров как в самих дренируемых пластах, так и в окружающих их породах возникает новое напряженно-деформированное состояние, которое проявляется в вертикальных и горизонтальных перемещениях массива горных пород, в том числе и поверхности земли. В зависимости от продолжительности, интенсивности и объема водоотбора эти перемещения могут достигать ощутимых размеров, поэтому в зданиях и сооружениях, находящихся в зоне депрессионных воронок, иногда возникают опасные по величине деформации. В процессе проведения осушительных работ на месторождениях железных руд наибольшие по величине перемещения в дренируемых водоносных пластах и перекрывающих их породах возникнут в зоне, примыкающей к дренажным устройствам. В ней, как правило, находятся шахтные стволы, здания подъемных машин, эстакады, вентиляторные и компрессорные установки, в связи с этим исходя из производительности и режима работы системы дренажа, важно предварительно оценить деформации, которые будут

происходить в массиве горных пород и на дневной поверхности.

2.1. Теоретические основы метода расчета деформаций горных пород под влиянием изменения напоров подземных вод

При решении практических задач, связанных с оценкой деформаций горных пород под влиянием дренажных работ, проводимых на месторождениях железных руд со сложными гидрогеологическими условиями, необходимо установить связь между изменениями напора в водоносном пласте и деформациями слагающих и перекрывающих его пород. Имеются работы [2], где эта связь устанавливалась с привлечением компрессионной теории консолидации грунтов. Поскольку деформация водоносных и окружающих их пород при водоотборах носит пространственный характер, то привлечение компрессионной теории консолидации грунтов к оценке деформаций в этих условиях может дать приближенную величину только вертикальным перемещениям.

В этой работе методика расчета деформаций водонасыщенных и перекрывающих их пород при изменении напоров подземных вод базируется на иной теории, физические предпосылки которой полностью соответствуют теории упругого режима фильтрации. Математической основой построения методики оценки деформаций водоносных пород при изменении в них напоров служит совместное решение уравнений упругости и теории упругого режима фильтрации. Как известно [3, 4, 5], в упругом водоносном пласте с изменением в нем напора при водоотборах увеличивается объем зерен (скелета пласта), так как уменьшается их плотность из-за снижения гидростатического давления, и поверхность контактов между ними, происходит переупаковка самих зерен и разрушение связующего их цемента. Эти деформации водовмещающих пород выражаются в сжатии и уменьшении в связи с этим первоначальной мощности водо -

носного пласта под влиянием эффективных давлений. При снижении гидростатического давления и сжатия водоносного пласта в целом перекрывающая его толща пород стремится прогнуться, что проявляется в оседании дневной поверхности в пределах развившейся области влияния водопонижения и дренажа. Математически процесс деформации водоносных пород при изменении в них напоров описывается следующим образом.

Принято считать [3, 5], что горное давление (внешняя нагрузка) Γ_{ij}, действующее со стороны кровли водоносного пласта, уравновешивается напряжениями в системе породы σ_{ij} и давлением в воде p. Соотношение между этими величинами в тензорной форме выражается следующей формулой [5]:

$$\Gamma_{ij} = (1-n)\sigma_{ij} + np\delta_{ij} = \sigma^{f}_{ij} + p\delta_{ij}, \qquad (2.1)$$

где σ^{f}_{ij} – фиктивное (эффективное) напряжение, некоторая часть полного напряжения σ_{ij}; δ_{ij} – символ Кронекера; δ_{ij} $\begin{cases} 0 \text{ при } i \neq j \\ 1 \text{ при } i = j \end{cases}$ $(i, j = x, y, z)$.

Поскольку горное давление Γ_{ij} при снижении давления в водоносном пласте p остается постоянным, то $d\sigma^{f}_{ij} = -dp$, т.е. снижение давления (напора) воды приводит к эквивалентному повышению нагрузки на скелет породы, слагающей водоносный пласт. Гипотеза о постоянстве горного давления во времени и полной передаче нагрузки на скелет водовмещающей породы со стороны перекрывающих пород реализуется, как это показано в работах [5, 6], если радиус влияния при откачке в 2–3 раза превышает мощность перекрывающих пород. Это условие практически всегда выполняется при проведении дренажных работ на месторождениях полезных ископаемых со сложными гидрогеологическими условиями.

Фиктивные напряжения σ^{f}_{ij} и связанные с ними деформации пород являются функциями $\Delta p = rs(x, y, z, t)$. Полную деформацию пласта в результате действия нагрузки $\Delta p = rs$ можно представить в виде двух слагаемых

$$e_{ij} = e_{ij}^{(1)} + e_{ij}^{(2)} . \qquad (2.2)$$

Деформации $e_{ij}^{(1)}$ обусловлены изменением плотности твердой фазы породы, при повышении или понижении давления $\Delta p = \gamma S$ возникающие при этом напряжения связаны, в пределах малых смещений, с $e_{ij}^{(1)}$ уравнениями классической теории упругости

$$e_{ij}^{(1)} = \frac{1}{2\mu}\left[\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\lambda\delta_{ij}\right] , \qquad (2.3)$$

где μ и ν – соответственно модуль сдвига 10^9 Па и коэффициент Пуассона вмещающих пород, $2\mu = E/(1+\nu)$;
E – модуль упругости тех же пород, т/м^2;
$\lambda = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$ – сумма главных напряжений, т/м^2.

Деформации $e_{ij}^{(2)}$, возникающие в пласте при изменении его пористости за счет сжатия скелета породы (в том числе и за счет разрушения связующего зерна цемента) в пределах линейной зависимости между деформациями и действующим давлением, связаны соотношениями

$$e_{ij}^{(2)} = \beta\gamma S\delta_{ij} , \qquad (2.4)$$

где β – коэффициент объемного сжатия породы, м^2/т.

Таким образом, соотношения (2.2) с учетом уравнений (2.3) и (2.4) перепишутся так

$$e_{ij} = \frac{1}{2\mu}\left[\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\lambda\delta_{ij}\right] + \beta\gamma S\delta_{ij} . \qquad (2.5)$$

Из формулы (2.5) получаем напряжение

$$\sigma_{ij} = 2\mu\left(e_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu}\theta\delta_{ij} - \frac{1+\nu}{1-2\nu}\beta\gamma S\delta_{ij}\right). \qquad (2.6)$$

Подставляя выражения (2.6) в уравнения движения [7]

$$\sum_j \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial_j} = \rho\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (\rho - \text{плотность}), \qquad (2.7)$$

получим

$$\Delta u_i + \frac{1}{1-2\nu}\frac{\partial \theta}{\partial i} - \frac{\rho}{\mu}\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu}\frac{\beta\gamma\partial S}{\partial i}, \qquad (2.8)$$

где u_i – перемещения по направлениям осей x,y,z – u,v,w;

$\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$.

Можно показать, что уравнения (2.8) без членов, содержащих множитель ρ (инерционные эффекты не учитываются), с учетом того, что $E = (1-2\nu)/\beta$ и $\rho = \gamma S$ совпадают с уравнениями Био [8] и Зарецкого Ю.К. [9] при $\alpha_\tau = \alpha_{\tau\rho}$ полученными иным путем.

Уравнение (2.8), переписанное для пространственной, осесимметричной и плоской деформаций, после отбрасывания членов, содержащих множитель ρ, принимает следующий вид:

Пространственная деформация:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial x};$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial z} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial y};$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} =$$

$$= \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial z}. \qquad (2.9)$$

Осесимметричная деформация:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{z}\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{z^2} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial z \partial z} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial z};$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\frac{1}{z}\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial z} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{1}{z}\frac{\partial u}{\partial z} =$$

$$= \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial z}. \qquad (2.10)$$

Плоская деформация:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial x};$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2(1-\nu)}\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{\partial S}{\partial z}. \qquad (2.11)$$

Для определения понижений S (x, y, z, t) в деформируемом водоносном пласте имеем уравнение

$$a\nabla S = \partial S/\partial t, \qquad (2.12)$$

где a – коэффициент пьезопроводности водоносного пласта, $м^2$/сут; t – время, сут; ∇ – оператор Лапласа.

Для перекрывающих водоносный пласт пород, где снижения уровней подземных вод не происходит, соответствующая система уравнений в перемещениях получается из соотношений (2.9) – (2.11), в которых правую часть необходимо приравнять нулю.

Таким образом, решению задачи по определению напряженно-деформированного состояния дренируемых и перекрывающих пород должно предшествовать определение изменения напоров в водоносных пластах в соответствии с заданным режимом системы дренажа и гидродинамическими пластовыми условиями, что представляет собой довольно трудоемкий и сложный процесс. Даже при откачке из одного водоносного пласта, перекрытого толщей непроницаемых горных пород, расчетная схема представляет собой слоистую систему деформируемых пород, решение задачи по определению перемещений и напряжений в которой аналитическими методами чрезвычайно трудно. Для определения напряженно-деформированного состояния таких систем рекомендуется применение методов аналогового моделирования и ЭЦВМ.

2.2. Методы моделирования деформаций слоистых толщ на АВМ (сеточных электроинтеграторах)

Уравнения (2, 9) – (2, 11) аналогичны уравнениям теории термоупругости, описывающим деформацию упругих материалов под влиянием изменения температуры среды [7, 10]. В работе Коноплева И.Д. [11] излагается методика решения плоской задачи теории термоупругости, основные положения которой используются нами для построения методики моделирования напряженно-деформированного состояния пород под влиянием изменения напоров подземных вод.

2.2.1. Пространственная деформация

Уравнения (2, 9) переписываются в конечно-разностной форме для разбивки области, показанной на рис. 2.1, а – в,

$$\frac{U_1-U_0}{x_{1-0}\Delta x}+\frac{U_3-U_0}{x_{3-0}\Delta x}+\frac{1-2\nu}{2(1+\nu)}\left[\frac{U_2-U_0}{y_{2-0}\Delta y}+\frac{U_4-U_0}{y_{4-0}\Delta y}\right]+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{U_{0'}-U_0}{z_{0'-0}\Delta z}+\frac{U_{0''}-U_0}{z_{0''-0}\Delta z}\right]+$$

$$+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{V_2-V_6+V_1-V_0}{\Delta x\,\Delta y}+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{W_{0'}-W_1'+W_1-W_0}{\Delta x\,\Delta z}=\frac{1+\nu}{1-\nu}\gamma\beta\frac{S_3-S_1}{2\Delta x};$$

$$\frac{V_2-V_0}{y_{2-0}\Delta y}+\frac{V_4-V_0}{y_{4-0}\Delta y}+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{V_1-V_0}{x_{1-0}\Delta x}+\frac{V_3-V_0}{x_{3-0}\Delta x}\right]+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{V_{0'}-V_0}{z_{0'-0}\Delta z}+\frac{V_{0''}-V_0}{z_{0''-0}\Delta z}\right]+$$

$$+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{U_2-U_6+U_1-U_0}{\Delta x\,\Delta y}+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{W_{0'}-W_4'+W_4-W_0}{\Delta y\,\Delta z}=\frac{1+\nu}{1-\nu}\gamma\beta\frac{S_2-S_4}{2\Delta y};$$

$$\frac{W_{0'}-W_0}{z_{0'-0}\Delta z}+\frac{W_{0''}-W_0}{z_{0''-0}\Delta z}+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{W_2-W_0}{y_{2-0}\Delta y}+\frac{W_4-W_0}{y_{4-0}\Delta y}\right]+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{W_1-W_0}{x_{1-0}\Delta x}+\frac{W_3-W_0}{x_{3-0}\Delta x}\right]+$$

$$+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{U_{0'}-U_1'+U_1-U_0}{\Delta x\,\Delta z}+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{V_{0'}-V_4'+V_4-V_0}{\Delta y\,\Delta z}=$$

$$=\frac{1+\nu}{1-\nu}\gamma\frac{S_{0'}-S_{0''}}{2\Delta z}. \qquad (2.13)$$

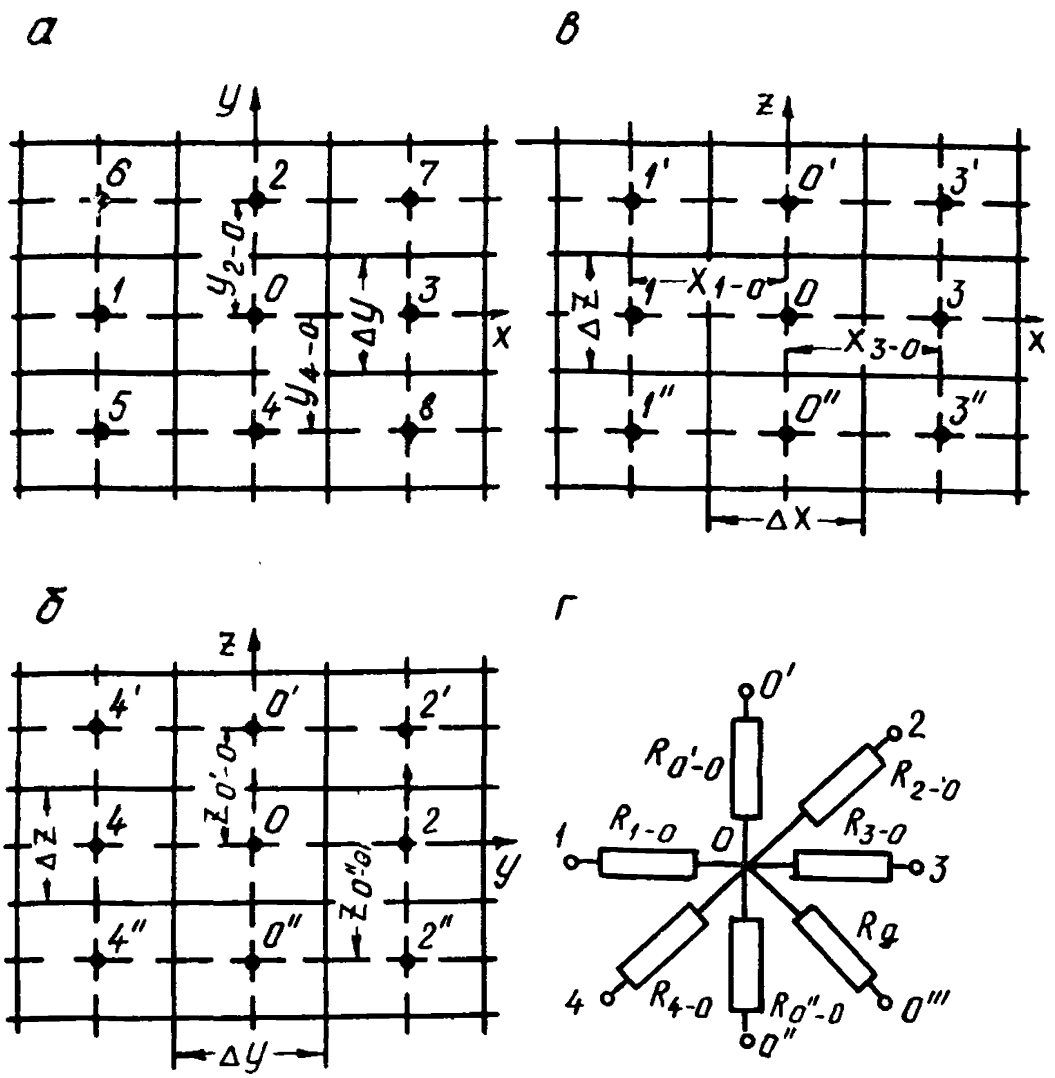


Рис.2.1. Схема построения сетки по осям x, y и z для среднего узла:

а – в плоскости x, y (сетка u); б – в плоскости z, y (сетка v); в – в плоскости x, z (сетка w); штриховые линии – сетка; 0, 1, 2, 3 – узловые точки; сплошные линии – границы блоков; г – расчетный узел электрической сеточной модели.

Уравнения (2.13) сопоставим с уравнением для баланса электрического тока в узле номер 0 (рис.2.1, г)

$$\frac{V_1 - V_0}{R_{1-0}} + \frac{V_2 - V_0}{R_{2-0}} \quad \frac{V_3 - V_0}{R_{3-0}} + \frac{V_4 - V_0}{R_{4-0}} + \frac{V_{0'} - V_0}{R_{0'-0}} + \frac{V_{0''} - V_0}{R_{0''-0}} + \frac{V_{0'''} - V_0}{R_\partial} = 0. \quad (2.14)$$

Для аналогии выражений (2.13), умноженных на $2(1-\nu)\Delta x\Delta y\Delta z$, и (2.14) параметры электрических сеток (их здесь будет три – U, V и W), составленных из омических сопротивлений, необходимо определять по следующим формулам:

1. Для сетки U

$$R_{1-0} = \frac{X_{1-0}}{2(1-\nu)\Delta y\Delta z}\alpha_R; \qquad R_{3-0} = \frac{X_{3-0}}{2(1-\nu)\Delta y\Delta z}\alpha_R;$$

$$R_{2-0} = \frac{Y_{2-0}}{(1-2\nu)\Delta x\Delta z}\alpha_R; \qquad R_{4-0} = \frac{Y_{4-0}}{(1-2\nu)\Delta x\Delta z}\alpha_R;$$

$$R_{0'-0} = \frac{Z_{0'-0}}{(1-2\nu)\Delta x\Delta y}\alpha_R; \qquad R_{0''-0} = \frac{Z_{0''-0}}{(1-2\nu)\Delta x\Delta y}\alpha_R; \quad R_\partial = 1\alpha_R, \quad (2.15)$$

где α_R – масштаб электрических сопротивлений, см·Ом.

На концах сопротивлений R_∂ устанавливается разность потенциалов, которая определяется по формуле

$$V^{(u)}_{0''-0} = [(U_2 - U_6 + U_1 - U_0)\Delta z + (W_{0'} - W_{1'} + W_1 - W_0)\Delta y + (1+\nu)\gamma\beta(S_1 - S_3)\Delta y\Delta z]\alpha_V, \quad (2.16)$$

где α_V – масштаб перехода от перемещений в потенциалы, В/см^2.

При наличии на блоке управления интегратора делителя тока (стоков и источников) в расчетный узел вместо разности потенциалов (2.16) можно подавать ток

$$J^{(u)}_0 = [(U_2 - U_6 + U_1 - U_0)\Delta z + (W_{0'} - W_{1'} + W_1 - W_0)\Delta y + (1+\nu)\gamma\beta(S_4 - S_2)\Delta x\Delta z]\frac{\alpha_V}{\alpha_R}. \quad (2.17)$$

Аналогичным путем находим электрические параметры сетки V и W.

2. Для сетки V будем иметь

$$R_{2-0} = \frac{Y_{2-0}}{2(1-\nu)\Delta x\Delta z}\alpha_R; \qquad R_{4-0} = \frac{Y_{4-0}}{2(1-\nu)\Delta x\Delta y}\alpha_R;$$

$$R_{1\text{-}0}=\frac{X_{1\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta y\Delta z}\alpha_R\,;\qquad R_{3\text{-}0}=\frac{X_{3\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta y\Delta z}\alpha_R\,;$$

$$R_{0'\text{-}0}=\frac{Z_{0'\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta y\Delta x}\alpha_R\,;\qquad R_{0''\text{-}0}=\frac{Z_{0''\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta y\Delta x}\alpha_R\,;\qquad R_{\partial}=1\cdot\alpha_R\,. \qquad (2.18)$$

$$V_{0''\text{-}0}^{(u)}=\left[(U_2-U_6+U_1-U_0)\Delta z+(W_{0'}-W_4'+W_4-W_0'')\Delta x+\right.$$
$$\left.+(1+\nu)\gamma\beta(S_4-S_2)\Delta x\Delta z\right]\alpha_V\,; \qquad (2.19)$$

$$J_0^{(u)}=\left[(U_2-U_6+U_1-U_0)\Delta z+(W_{0'}-W_4'+W_4-W_0'')\Delta x+\right.$$
$$\left.+(1+\nu)\gamma\beta(S_4-S_2)\Delta x\Delta z\right]\frac{\alpha_V}{\alpha_R}\,. \qquad (2.20)$$

3. Для сетки W

$$R_{0'\text{-}0}=\frac{Z_{0'\text{-}0}}{2(1-\nu)\Delta x\Delta y}\alpha_R\,;\qquad R_{0''\text{-}0}=\frac{Z_{0''\text{-}0}}{2(1-\nu)\Delta x\Delta y}\alpha_R\,;$$

$$R_{2\text{-}0}=\frac{y_{2\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta x\Delta z}\alpha_R\,;\qquad R_{4\text{-}0}=\frac{y_{4\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta x\Delta z}\alpha_R\,;$$

$$R_{1\text{-}0}=\frac{X_{1\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta y\Delta z}\alpha_R\,;\qquad R_{3\text{-}0}=\frac{X_{3\text{-}0}}{(1-2\nu)\Delta y\Delta z}\alpha_R\,;$$

$$R_{\partial}=1\cdot\alpha_R\,. \qquad (2.21)$$

$$V_{0''\text{-}0}^{(w)}=\left[(U_{0'}-U_{1'}+U_1-U_0)\Delta y+(V_{0'}-V_{4'}+V_4-V_0)\Delta x+\right.$$
$$\left.+(1+\nu)\gamma\beta(S_{0'}-S_{0''})\Delta x\Delta y\right]\alpha_V\,; \qquad (2.22)$$

$$J_0^{(w)}=\left[(U_{0'}-U_{1'}+U_1-U_0)\Delta y+(V_{0'}-V_{4'}+V_4-V_0)\Delta x+\right.$$
$$\left.+(1+\nu)\gamma\beta(S_{0'}-S_{0''})\Delta x\Delta y\right]\frac{\alpha_V}{\alpha_R}\,. \qquad (2.23)$$

Решение задачи производится одновременно на трех или на одной, что хуже, сетке методом последовательных приближений. На сетке-модели, параметры которой рассчитаны, например, по формулам (2.15), определяются перемещения u. На границе области задаются значения перемещений u, переведенные в потенциалы. В узловых точках сетки, расположенных по кровле сжимаемого слоя (пласта), на сопротивлениях R_∂ устанавливается разность потенциалов, подсчитанная по формуле (2.16), или подается ток непосредственно в узел, величина которого определяется по соотношению (2.17).

При вычислении разности потенциалов $V_{o''-o}^{(u)}$ или тока $J_o^{(u)}$ для узловых точек, расположенных в зоне перекрывающих пород, и промежуточных в зоне сжимаемого слоя в формулах (2.16) и (2.17) необходимо отбросить члены (третье слагаемое), содержащие величины понижений S уровней подземных вод. На первой итерации величины перемещений v и w, входящие в соотношения (2.16) и (2.17), принимаются равными нулю. При последующих приближениях процесс решения такой же, как и в первом, однако при расчете разности потенциалов по формуле (2.16) и тока по (2.17) значения v и w берутся из предшествующего приближения. Таким же способом решается задача на сетках v и w. Итерационный процесс считается законченным, когда значения перемещений в предшествующем и последующем приближении совпадают. Решение пространственной задачи деформации чрезвычайно сложно. Поэтому при проведении инженерных расчетов, как правило, приходится существенно схематизировать действительные условия фильтрации подземных вод и деформаций пород, а реальные контуры дренажных устройств приводить к линейным или круговым. В этом случае расчетная схема деформирования пород значительно упрощается: появляется возможность проведения расчетов напряженно-деформированного состояния пород при изменении напоров подземных вод на моделях меньшей мерности. Ниже приводится методика электромоделирования плоской (в разрезе) и осесимметричной деформации.

2.2.2. Осесимметричная деформация

Уравнения осесимметричной деформации (2.10) в конечно-разностной форме для разбивки области, показан-

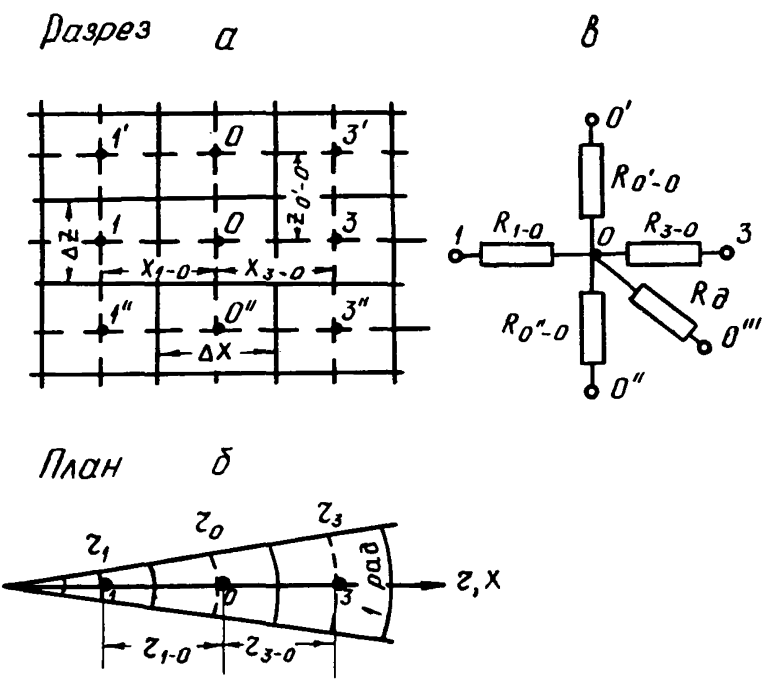


Рис.2.2. Схема построения сетки по осям x и y (плоская деформация); z и r (осесимметричная деформация) для расчетного узла; штриховые линии – сетка; 0, 1, 2, 3 – узловые точки; сплошные линии – границы блоков; б – расчетный узел сеточной модели.

ной на рис. 2.2, а, запишутся так:

$$\frac{u_3-u_0}{(r_3-r_0)\frac{r_3-r_1}{2}}+\frac{u_1-u_0}{(r_1-r_0)\frac{r_3-r_1}{2}}+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{w_{0''}-w_{0'}}{(z_{0''}-z_0)\frac{z_{0'}-z_{0''}}{2}}+\frac{w_{0'}-w_0}{(z_{0'}-z_0)\frac{z_{0'}-z_{0''}}{2}}\right]+$$

$$+\frac{1}{z_0}\frac{U_3-U_1}{(z_3-z_1)}-\frac{U_0}{z_0^2}+\frac{1}{2(1-\nu)}\cdot\frac{w_3'-w_3''-w_1'+w_1''}{4\frac{z_3-z_1}{2}\cdot\frac{z_0'-z_0''}{2}}=\frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{S_3-S_1}{z_3-z_1};$$

$$\frac{w_0''-w_0}{(z_0-z_0'')\frac{z_0'-z_0''}{2}}+\frac{w_0'-w_0}{(z_0'-z_0)\frac{z_0'-z_0''}{2}}+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{w_3-w_0}{(z_3-z_0)\frac{z_3-z_1}{2}}+\frac{w_1-w_0}{(z_1-z_0)\frac{z_3-z_1}{2}}\right]+$$

$$+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\frac{1}{z_0}\frac{w_3-w_1}{z_3-z_1}+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{u_3'-u_3''-u_1'+u_1''}{4\frac{z_3-z_1}{2}\frac{z_0'-z_0''}{2}}+\frac{1}{2(1-\nu)}\frac{1}{z_0}\frac{U_0'-U_0''}{z_0'-z_0''}=$$

$$=\frac{1+\nu}{1-\nu}\beta\gamma\frac{S_0'-S_0''}{z_0'-z_0''}. \qquad (2.24)$$

Уравнение токов для электрической цепи (рис.2.2,б) имеет вид

$$\frac{V_1-V_0}{R_{1-0}}+\frac{V_3-V_0}{R_{3-0}}+\frac{V_0''-V_0}{R_{0''-0}}+\frac{V_0''-V_0}{R_\partial}+\frac{V_{0'}-V_0}{R_{0'-0}}=0. \qquad (2.25)$$

Для аналогии выражений (2.24), умноженных на $2(1-\nu)\frac{z_3-z_1}{2}\cdot\frac{z_0'-z_0''}{2}$, и (2.25) значения сопротивлений сеток w и u определяются по следующим формулам:

1. Для сетки w

$$R_{1-0}=\frac{2(z_1-z_0)}{(1-2\nu)(z_{0'}-z_{0''})}\alpha_R; \qquad R_{3-0}=\frac{2(z_3-z_0)}{(1-2\nu)(z_{0'}-z_{0''})}\alpha_R;$$

$$R_{0'-0}=\frac{z_0-z_{0''}}{(1-\nu)(z_3-z_1)}\alpha_R; \qquad R_{0''-0}=\frac{z_0-z_{0''}}{(1-\nu)(z_3-z_1)}\alpha_R; \qquad R_\partial=\infty_R. \qquad (2.26)$$

2. Для сетки u

$$R_{1-0}=\frac{1}{1-\nu}\frac{z_0-z_1}{z_{0'}-z_{0''}}\alpha_R; \qquad R_{3-0}=\frac{1}{1-\nu}\frac{z_3-z_0}{z_{0'}-z_{0''}}\alpha_R;$$

$$R_{0'-0}=\frac{2}{1-2\nu}\frac{z_{0'}-z_0}{z_3-z_1}\alpha_R; \qquad R_{0''-0}=\frac{2}{1-2\nu}\frac{z_0-z_{0''}}{z_3-z_1}\alpha_R; \qquad R_\partial=1\alpha_R. \qquad (2.27)$$

На сопротивлениях R_∂ сетки w или u устанавливается разность потенциалов, которая подсчитывается по формулам

$$V_{0''-0}^{(w)} = \left[\frac{U_{3'} - U_{3''} - U_{1'} + U_{1''}}{4} - \frac{(1-2\nu)(z_{0'} - z_{0''})(w_1 - w_3)}{4z_0} + \right.$$

$$\left. + \frac{z_3 - z_1}{4z_0}(U_{0'} - U_{0''}) + (1+\nu)\beta\gamma S_0 \frac{z_3 - z_1}{2}\right]\Delta_r ; \qquad (2.28)$$

$$V_{0''-0}^{(u)} = \left[\frac{w_{3'} - w_{3''} - w_{1'} + w_{1''}}{4} + \frac{1-\nu}{2z_0}(z_{0'} - z_{0''})(U_3 - U_1) - \right.$$

$$\left. - \frac{(1-\nu)(z_3 - z_1)(z_{0'} - z_{0''})}{z_0^2}\frac{U_0}{2} + (1+\nu)\beta\gamma(S_1 - S_3)\frac{z_{0'} - z_{0''}}{2}\right]\Delta_r . \qquad (2.29)$$

Однако вместо задания разности потенциалов по (2.28) и (2.29) через сопротивления R_3 в расчетные узлы сеток w и u можно подавать непосредственно ток, который определяется по формулам

$$J_0^{(w)} = \left[\frac{U_{3'} - U_{3''} - U_{1'} + U_{1''}}{4} - \frac{(1-2\nu)(z_{0'} - z_{0''})(w_1 - w_3)}{4z_0} + \right.$$

$$\left. + \frac{z_3 - z_1}{4z_0}(U_{0'} - U_{0''}) + (1+\nu)\beta\gamma S_0 \frac{z_3 - z_1}{2}\right]\frac{\Delta_r}{\Delta_R} ; \qquad (2.30)$$

$$J_0^{(u)} = \left[\frac{w_{3'} - w_{3''} - w_{1'} + w_{1''}}{4} + \frac{1-\nu}{2z_0}(z_{0'} - z_{0''})(U_3 - U_1) - \right.$$

$$\left. - \frac{(1-\nu)(z_3 - z_1)(z_{0'} - z_{0''})}{2z_0^2}U_0 + (1+\nu)\beta\gamma(S_1 - S_3)\frac{z_{0'} - z_{0''}}{2}\right]\frac{\Delta_r}{\Delta_R} . \qquad (2.31)$$

Решение осесимметричной задачи деформации проводится одновременно на двух или одной сетках методом последовательных приближений в той же последовательности, что и для рассмотренной выше пространственной задачи, здесь при вычислении разности потенциалов и силы тока соответственно по формулам (2.28), (2.29) и (2.30), (2.31) – вторые слагаемые, содержащие величину понижения уровня в дренируемом пласте, удерживаются только для узловых точек сетки-модели, расположенных по кровле пласта. Для остальных узловых то-

чек сетки-модели четвертые слагаемые при вычислении разности потенциалов и силы тока должны быть отброшены.

2.2.3. Плоская деформация (в разрезе)

Конечно-разностная аппроксимация уравнений плоской деформации (2.11) для разбивки области, показанной на рис.2.2, а, имеет вид

$$\frac{w_{0'}-w_0}{z_{0'-0}\Delta z}+\frac{w_{0''}-w_0}{z_{0''-0}\Delta z}+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{w_1-w_0}{x_{1-0}\Delta x}+\frac{w_3-w_0}{x_{3-0}\Delta x}\right]+$$

$$+\frac{1}{2(1-\nu)}\,\frac{u_{3'}+u_{1''}-u_{1'}-u_{3''}}{4\Delta x\Delta z}=\frac{1+\nu}{1-\nu}\,\beta\gamma\,\frac{S_0}{2\Delta z}\;;$$

$$\frac{u_1-u_0}{x_{1-0}\Delta x}+\frac{u_3-u_0}{x_{3-0}\Delta x}+\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}\left[\frac{u_{0'}-u_0}{z_{0'-0}\Delta z}+\frac{u_{0''}-u_{0'}}{z_{0''-0'}\Delta z}\right]+$$

$$+\frac{1}{2(1-\nu)}\,\frac{w_{3'}+w_{1''}-w_{1'}-w_{3''}}{4\Delta x\,\Delta z}=\frac{1+\nu}{1-\nu}\,\beta\gamma\,\frac{S_3-S_1}{2\Delta x}\;. \qquad (2.32)$$

Уравнение для баланса электрического тока в узле номер 0 (рис.2.2, б) имеет форму (2.25). Для аналогии уравнений (2.32), умноженных на $2(1-\nu)\Delta z\Delta x$, и (2.25) параметры сеток-моделей w и u необходимо определять по следующим формулам:

Для сетки w

$$R_{1-0}=\frac{x_{1-0}}{(1-2\nu)\Delta z}\,\alpha_R\;;\qquad R_{3-0}=\frac{x_{3-0}}{(1-2\nu)\Delta z}\,\alpha_R\;;$$

$$R_{0'-0}=\frac{z_{0'-0}}{2(1-\nu)\Delta x}\,\alpha_R\;;\qquad R_{0''-0}=\frac{z_{0''-0}}{2(1-\nu)\Delta x}\,\alpha_R;\qquad R_0=1\alpha_R. \qquad (2.33)$$

$$V_{0'''-0}=\left[\frac{u_{3'}+u_{1''}-u_{1'}-u_{3''}}{4}+(1+\nu)\beta\gamma S_0\Delta x\right]\alpha_v\;; \qquad (2.34)$$

$$J_0=\left[\frac{u_{3'}+u_{1''}-u_{1'}-u_{3''}}{4}+(1+\nu)\beta\gamma S_0\Delta x\right]\frac{\alpha_v}{\alpha_R}\;. \qquad (2.35)$$

Для сетки μ

$$R_{1-0}=\frac{\chi_{1-0}}{2(1-\nu)\Delta z}\alpha_R\,; \qquad R_{3-0}=\frac{\chi_{3-0}}{2(1-\nu)\Delta z}\alpha_R\,;$$

$$R_{0'-0}=\frac{\chi_{0'-0}}{(1-2\nu)\Delta x}\alpha_R\,; \qquad R_{0''-0}=\frac{\chi_{0''-0}}{(1-2\nu)\Delta x}\alpha_R\,; \qquad R_\partial=1\alpha_R\,. \quad (2.36)$$

$$V_{0''-0}=\left[\frac{w_{3'}+w_{1''}-w_{1'}-w_{3''}}{4}+(1+\nu)\beta\gamma(S_1-S_3)\Delta z\right]\alpha_\gamma\,; \quad (2.37)$$

$$J_0=\left[\frac{w_{3'}+w_{1''}-w_{1'}-w_{3''}}{4}+(1+\nu)\beta\gamma(S_1-S_3)\Delta z\right]\frac{\alpha_\gamma}{\alpha_R}\,. \quad (2.38)$$

Как и прежде, разность потенциалов и токов по формулам (2.34), (2.37) и (2.35), (2.38) подсчитывается только для узлов сетки-модели, расположенных по кровле водоносных пластов, в которых происходит снижение напоров подземных вод под влиянием дренажных устройств. Для остальных узлов сетки-модели при расчетах разности потенциалов и токов по приведенным выше формулам второе слагаемое необходимо отбросить.

Процесс решения аналогичен рассмотренным выше пространственной и осесимметричной задачам.

2.2.4. Расчет и монтаж сеточной электромодели

Расчету деформаций пород под влиянием водопонижения предшествует расчет изменения напорных уровней подземных вод, обуславливающего изменение напряженного состояния как самих водонасыщенных пластов, так и окружающих их пород. Расчет фильтрации подземных вод лучше всего выполнить методом электромоделирования, хотя в отдельных случаях не исключено применение для этих целей и аналитических методов. Методика электромоделирования фильтрации достаточно подробно изложена в работах [12, 13] и поэтому здесь не приводится. Расчет сеточной электромодели напряженного состояния пород покажем на примере, характерном для формирования депрессионных воро-

нок в процессе освоения обводненных месторождений полезных ископаемых.

Напомним, что электромоделирование перемещений для осесимметричной деформации производится на двух сетках-плоскостях w и u с ортогональными координатами z и r. При моделировании осесимметричной деформации выделяется характерный для расчета сектор с углом, равным одному радиану (рис.2.2, а), в котором разбиваются расчетные узловые сечения и выделяются элементарные блоки, что достигается дискретизацией области деформации путем расчленения ее системой ортогональных прямых параллельных осям координат z и r, точки пересечения которых образуют узлы сетки, а расстояния между ними - шаги сетки. Система ортогональных прямых, проведенная через середину шагов сетки (сплошные линии на рис.2.1, а), образуют блоки в пределах выделенной области деформации пород. Количество узлов сетки зависит от размеров изучаемой области, литологического строения, а также мощности водонасыщенных и перекрывающих пород. Узловые точки лучше располагать по линиям литологических границ. Как правило, при моделировании деформаций применяется прямоугольная сетка с переменным шагом. Вблизи внутренних границ области, где обычно наблюдаются крутые депрессионные поверхности, шаг сетки целесообразно уменьшить.

По формулам (2.26), (2.27) производится расчет омических сопротивлений, из которых составляется электрическая модель. При этом масштаб сопротивлений α_R выбирается в соответствии с имеющимися в наличии электрическими сопротивлениями (резисторами). Например, в комплект электроинтегратора БУСЭ-70 входят резисторы, при помощи которых можно выставлять сопротивления в диапазоне от 5 до $4{,}7 \cdot 10^6$ Ом.

При расчете горизонтальных сопротивлений, расположенных в узлах сетки на границе смены литологического состава пород, характеризующихся различными значениями коэффициента Пуассона, в формулах для расчета $R_{1\text{-}0}$ и $R_{3\text{-}0}$ по соотношениям (2.26) и (2.27), вмес-

то ν необходимо ввести среднее его значение по формуле

$$\nu_{cp} = \frac{2\nu_{o'} \cdot \nu_{o''}}{\nu_{o'} + \nu_{o''}} , \qquad (2.39)$$

где $\nu_{o'}$ и $\nu_{o''}$ – значения коэффициента Пуассона в смежных по вертикали узлах по отношению к среднему узлу с номером 0.

Согласно составленной по результатам расчета сопротивлений схеме модели, производится монтаж электрической сетки–аналога деформационной модели. При этом в узлы ее устанавливаются, согласно монтажной схеме, соответствующие сопротивления. По формулам (2.28) и (2.29) в соответствии с понижениями в расчетных узлах для сетки w (или их разностями в смежных по отношению к среднему узлу для сетки u) подсчитывается разность потенциалов $V_{o''-o}$, устанавливаемая на концах сопротивлений $R_д$ с делителя напряжений, отградуированного в процентах. Масштаб напряжений α_v рассчитывается по формуле

$$\alpha_v = \frac{V_д}{V_{max} - V_{min}} , \qquad (2.40)$$

где $V_д$ – напряжение делителя, В/см; V_{max} и V_{min} – соответственно наибольшее и наименьшее значение суммы, стоящей в квадратных скобках выражений (2.28) и (2.29).

Таким образом, результат, полученный по выражениям (2.28) и (2.29) с учетом формулы (2.40), умноженный на 10, даст необходимую разность потенциалов $V_{o''-o}$, устанавливаемую на концах сопротивлений $R_д$, выраженную в процентах.

При задании в расчетные узлы токов масштаб $\alpha_i = \alpha_v / \alpha_R$ выбирается исходя из величин тока на блоке делителя источников и стоков, и слагаемых, заключенных в квадратные скобки формул (2.30) и (2.31). По установленным масштабным коэффициентам α_i и α_R определяется масштаб напряжений α_v

$$\alpha_v = \alpha_i \cdot \alpha_R . \qquad (2.41)$$

После подключения сетки к источнику питания в узлах ее снимаются потенциалы, соответствующие перемещениям для первой итерации. Полученные значения электрических потенциалов пересчитываются при помощи масштабных коэффициентов напряжений в величины перемещений.

При задании в расчетные узлы токов искомая величина перемещения w или u при напряжении делителя 10В определяется по формуле

$$w(u) = V_{ш} \cdot \frac{10}{\alpha_v \cdot 100\%}, \qquad (2.42)$$

где $V_{ш}$ – отсчет на потенциометре измерительного устройства в момент компенсации, %.

Полученные величины перемещений w и u являются приближенными, так как итерационный процесс только начался.

Для второго приближения в расчетные узлы ранее составленной сетки-модели устанавливаются разности потенциалов на концах сопротивлений $R_д$ или задаются токи, рассчитанные соответственно по формулам (2.26), (2.27) и (2.28), (2.29), с учетом перемещений в узлах, полученных в первом приближении.

3. ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИЙ НИЖНЕГО КОМПЛЕКСА ВОДОНОСНЫХ ПОРОД И ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВОДОПОНИЗИТЕЛЬНЫХ И ДРЕНАЖНЫХ РАБОТ В НИЖНЕКАМЕННОУГОЛЬНЫХ ИЗВЕСТНЯКАХ ПРИ ОСВОЕНИИ ЯКОВЛЕВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА

3.1. Мероприятия по снижению напоров в нижнекаменноугольных известняках

Освоение Яковлевского железорудного месторождения КМА осложняется из-за наличия в кровле рудного тела мощной толщи осадочных пород, содержащих 7 водоносных горизонтов.

В обводнении рудной залежи принимают участие непосредственно руднокристаллический и гидравлически связанные с ним нижнекаменноугольный и келловейский водоносные горизонты. Эти горизонты на Яковлевском месторождении относятся к нижнему комплексу водоносных пород, для которого характерно слоистое строение толщи. Здесь хорошо проницаемые напорные пласты, представленные песками келловея, известняками карбона и руднокристаллическими образованиями, разделяются глинистыми слоями бат-байоса и почвы известняков карбона вместе с переотложенными рудами, каолинами и бокситовидными породами. Через эти глинистые слои, несмотря на их слабую водопроницаемость, происходит, как это было показано опытными работами [14], фильтрация из одного водоносного горизонта в другой под действием градиентов напоров. Поэтому при проведении водопонизительных работ в одном из этих горизонтов происходит снижение напорных уровней в соседних горизонтах, а следовательно, и деформация каждого из них и всей толщи в целом.

В самых общих чертах основные положения технического проекта осушения Яковлевского железорудного месторождения [15] состоят в следующем.

Рудная залежь размерами в плане 500 х 450 м вскрывается с помощью трех шахтных стволов (скипового, клетьевого и вентиляционного), закладываемых в лежачем боку рудной залежи, и трех квершлагов на горизонтах -300 и -400 м, сбиваемых полевыми штреками. Проектом принята слоевая система разработки с закладкой выработанного пространства. Высота горизонтального слоя 6,2 м.

Необходимыми условиями безопасного ведения горных работ по вскрытию и разработке продуктивной толщи на Яковлевском руднике являются, во-первых, предварительное снижение напорных уровней в нижнекаменноугольном и руднокристаллическом водоносных горизонтах и, во-вторых, осушение известняков карбона и рудной залежи в границах ведения очистных работ.

Согласно проекту [15] первое условие обеспечива-

ется с помощью системы водопонижающих скважин, пробуренных на нижнекаменноугольный водоносный горизонт по контуру разработки рудной залежи. В соответствии с календарным графиком строительства, снижение напорных уровней до кровли известняков карбона над рудной залежью в пределах контура водопонижающей установки достигается при помощи 23 скважин с расходом каждой 100 м^3/ч в течение 21 мес. Расстояние между смежными скважинами в плане составляет в среднем 170 м. К этому моменту из шахтных стволов 1,2 и 3* по известнякам карбона на горизонте -300 м под защитой 14 водопонижающих скважин к рудной залежи проводятся горные выработки-квершлаги, которые затем развиваются по контуру отработки как в лежачем, так и висячем боках, а водопонижающие скважины переоборудуются в сквозные фильтры.

Осушение известняков карбона в пределах участка разработки достигается с помощью горизонтальных горных выработок и буровых скважин, а рудная залежь осушается из горных выработок, пройденных по руде, и дренажных узлов, состоящих из 5-9 горизонтальных и наклонных скважин, пробуренных из ортов, а также полевых штреков и водопонижающих скважин, сооружаемых на горизонтах -300 и -400 м.

В течение 21 мес. строительного периода водопонижающая установка в известняках карбона будет работать в режиме постоянного расхода. По мере снижения уровней в скважинах до глубины погружения насосов и сооружения горных выработок водопонижающие скважины переоборудуются в сквозные фильтры, эксплуатируемые в режиме постоянного уровня.

---

* Проходка и оборудование шахтных стволов заканчивается до начала водопонизительных работ в известняках карбона.

3.2. Схематизация условий деформирования водоносных пород под влиянием их дренирования

Условия деформирования водоносных пластов определяются их гидродинамическими условиями, физико-механическими и фильтрационными свойствами вмещающих пород и воды, а также режимом работы дренажных устройств.

Гидродинамические, фильтрационные и физико-механические характеристики нижнего комплекса водоносных пород на Яковлевском месторождении следующие (снизу вверх): руднокристаллический водоносный горизонт приурочен в основном к богатым железным рудам, вывет-релым сланцам и кварцитам, мощность его в рудной толще составляет около 200 м, а в лежачем и висячем боках залежи - 40 м. Фильтрационные свойства горизонта весьма слабые, неоднородные и недостаточно изучены в висячем и лежачем боках рудной залежи.

Руднокристаллический горизонт гидравлически связан с вышележащим нижнекаменноугольным. Прямая гидравлическая связь между ними имеет место на ограниченных по площади участках непосредственного контакта водоносных известняков с рудным телом. На преобладающей площади месторождения эта взаимосвязь затруднена, особенно в лежачем и висячем боках, где на контакте с докембрийскими и наряду с встречающимися здесь бокситовидными породами значительное распространение получили довольно выдержанные по площади прослои каолинов мощностью до 10 м.

Руднокристаллические образования практически несжимаемы, а залегающий в их кровле глинистый слой - сжимаем ($a/(1+\varepsilon) = 4 \cdot 10^{-5}$ м^2/т).

Нижнекаменноугольный водоносный горизонт представлен известняками карбона. Его мощность над рудной полосой составляет в среднем 35 м, а в лежачем и висячем боках месторождения от 59 до 30 м. Чижняя толща известняков, как уже отмечалось выше, выполнена глинистыми прослоями, их в разрезе насчитывается от 1 до 13 мощностью от нескольких сантиметров до 6 иногда до

12 м. Напор водоносного горизонта 400–440 м над кровлей.

Фильтрационные свойства горизонта весьма неоднородны. Над рудной полосой коэффициент фильтрации в среднем 3,2–4,2 м/сут, в лежачем боку – около 0,1 м/сут и меньше. Наблюдательные скважины, оборудованные на известняки в лежачем боку месторождения, весьма слабо реагировали на откачку, проводимую из них над рудной полосой в период детальной разведки и опытно-производственного водопонижения [14]. В кровле горизонта залегает толща глин бат–байоса мощностью в среднем 35 м.

В течение 1971–1973 гг. институтом ВИОГЕМ опробовались откачками из семи опытных скважин известняки карбона в лежачем боку залежи. Шесть из них подтвердили ранее установленную весьма слабую проницаемость известняков лежачего бока, и только скв. 2кс в районе ствола 1 вскрыла в верхней части толщи в интервале 492–538,7 м сильно трещиноватую зону, при опробовании которой коэффициент фильтрации оказался равным 4,2 м/сут, а коэффициент пьезопроводности $1{,}4 \cdot 10^5$ м^2/сут.

Нижняя зона мощностью 40,2 м оказалась слабоводообильной с коэффициентом фильтрации 0,024 м/сут. Дальнейшие гидрогеологические исследования, проведенные в 1974–1975 гг. на месторождении по изучению фильтрационных свойств известняков карбона в лежачем боку залежи, подтвердили их слабую проницаемость. Известняки карбона относятся к слабосжимаемым породам ($a/(1+\varepsilon) = 2 \cdot 10^{-6}$ м^2/сут).

Келловейский водоносный горизонт представлен песками с многочисленными маломощными прослоями песчаников и реже – глин, развитых преимущественно в нижней его части. Мощность горизонта в среднем составляет 30 м, напор над кровлей 330 м. Фильтрационные свойства келловейских песков сравнительно однородны и характеризуются коэффициентами проводимости и пьезопроводности, равными соответственно $km = 14 \cdot 2$ м^2/сут и $a = 3{,}0 \cdot 10^5$ м^2/сут. Пески сжимаемые ($a/(1+\varepsilon) = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ м^2/т).

В кровле келловейского водоносного горизонта залегают юрские глины киммеридж-оксфорда мощностью 40 - 50 м, глинистые породы которого представлены плотными известковистыми разностями. В толще глин часто встречаются 0,5-1,5-метровые линзообразно залегающие прослои известняков или песчаников. Глины киммеридж-оксфорда характеризуются малой естественной влажностью, не превышающей обычно 16-18%, пористостью, равной 37-42%, и большой уплотненностью. Плотные монолитные глины киммеридж-оксфорда являются надежным водоупором, отделяющим водоносные горизонты верхней осадочной толщи от нижней.

В почве келловейского водоносного горизонта залегает толща глин бат-байоса средней мощностью 35 м. Характерной особенностью ее является наличие прослоев песчаных пород, содержащих напорные воды. Фильтрационные свойства рассматриваемых глин характеризуются величиной коэффициента фильтрации $K = 5 \cdot 10^{-5}$ м/сут, а физико-механические свойства - коэффициентом сжатия $m/(1+\varepsilon) = 7 \cdot 10^{-5}$ м^2/т.

Слабопроницаемая толща глин бат-байоса разделяет келловейский и нижнекаменноугольный водоносные горизонты. По данным опытно-производственного водопонижения в известняках карбона было установлено, что перетекание через глины бат-байоса сопровождается проявлением начального градиента фильтрации $i_0 = 4{,}2$. Таким образом, при проведении водопонизительных работ в нижнекаменноугольных известняках будет происходить перетекание вод из келловейского горизонта через глины бат-байоса, что приведет к уплотнению этих пород.

3.3. Прогноз снижения напорных уровней в нижнекаменноугольном и келловейском водоносных горизонтах

Определению напряженно-деформированного состояния водонасыщенных и перекрывающих пород предшествует расчет функции $S(x, y, z, t)$ - снижения напорных уровней в дренируемых пластах. Для оценки динамики

снижения напоров в нижнем комплексе водоносных пород на Яковлевском железорудном месторождении КМА принята трехслойная модель фильтрации: два основных водоносных горизонта нижнекаменноугольный и келловей-батский (гидрогеологические параметры руднокристаллического водоносного горизонта в период опытных работ отражены в параметрах нижнекаменноугольного горизонта) и разделяющий их, слабопроницаемый слой, представленный глинами бат-байоса, характеристика которых приведена в п.3.2.

Прогноз динамики уровней нижнекаменноугольного и келловейского водоносных горизонтов в процессе строительного водопонижения выполнен нами путем электро-моделирования фильтрации на сеточном электроинтеграторе БУСЭ-70 по методу Либмана [12, 13]. Весь период строительного водопонижения в известняках карбона во времени был разбит на два этапа (шага).

Первый этап, продолжительностью в среднем Δt_1 = =310 сут, соответствует периоду работы водопонижающих скважин, расположенных в лежачем боку рудного тела вокруг шахтных стволов и по трассе квершлагов, проводимых в сторону залежи.

Второй этап, длительностью Δt_2 =1140 сут, соответствует периоду работы водопонижающих скважин, расположенных по контуру отработки рудной залежи, совместно с горными дренажными выработками, пройденными на горизонте -300 м.

Келловейский водоносный горизонт при электромоделировании принят неограниченным в плане, а гидродинамические границы нижнекаменноугольного горизонта приняты в соответствии с данными работы [1].

При построении схемы взаимодействия келловейского и нижнекаменноугольного водоносных горизонтов исходили из предпосылки Гиринского-Мятиева, согласно которой движение подземных вод в хорошо проницаемых слоях происходит только в горизонтальной плоскости, а в слабопроницаемом раздельном слое только по вертикали. Причем, движение вод через глины бат-байоса происходит в условиях проявления начального градиента фильт-

рации, так что реакция келловейского водоносного горизонта на изменение напора в нижнекаменноугольном горизонте происходит в зоне, где будет достигнуто понижение напора на величину $S \geq i_0 m_0 = 4{,}2 \cdot 35 = 150$ м (m_0 – средняя мощность глин бат-байоса). Построение сетки-модели осуществлялось по рекомендациям, изложенным в в работах [12, 13]. Учитывая конструктивные особенности электроинтегратора БУСЭ-70, узлы панели-сетки которого представлены магазинами для сопротивлений R_x, R_y, R_z и R_t, область фильтрации в разрезе была представлена двумя этажами сеток омических сопротивлений, верхняя моделировала условия движения подземных вод в келловей-батском водоносном горизонте, а нижняя, содержащая сопротивление R_z, в каменноугольном. При этом параметры сетки-модели определялись по следующим формулам:

$$R_x = \frac{\Delta x}{T \Delta y} \alpha_R ; \qquad R_y = \frac{\Delta y}{T \Delta x} \alpha_R ; \qquad R_t = \frac{\Delta t}{\mu F} \alpha_R , \tag{3.1}$$

где Δx и Δy – соответственно размер (шаг) расчетного блока по направлениям x и y, м; km – проводимость водоносного пласта, м^2/сут; Δt – расчетный интервал (шаг) времени, сут; μ – водоотдача пласта; F – площадь расчетного блока, м^2; α_R – масштаб электрических сопротивлений, см·Ом.

Узловые точки сетки-модели келловейского водоносного горизонта соединялись со смежными (по оси) узловыми точками нижнекаменноугольного через вертикальные сопротивления R_z, рассчитываемые по формуле

$$R_z = \frac{m_0}{K_0 F} , \tag{3.2}$$

в которой m_0 и K_0 – соответственно мощность, м, и коэффициент фильтрации раздельного слоя глин бат-байоса, м/сут.

Размер области влияния при действии системы дренажа на шахтном поле Яковлевского рудника определялся по зависимости

$$R = 2\sqrt{at}, \qquad (3.3)$$

где a – коэффициент пьезопроводности водоносного горизонта, $м^2$/сут; t – время действия системы дренажа, сут.

При проведении расчетов приняты следующие исходные данные:

1. Для нижнекаменноугольного водоносного горизонта: в висячем боку залежи и над рудной полосой $(km)_1 = 150\ м^2$/сут, $a_1 = 1{,}2 \cdot 10^6 м^2$/сут, $\mu_1 = 1{,}25 \cdot 10^{-4}$, в зоне осушения пласта $\mu_1 = 0{,}05$; в лежачем боку залежи $(km)_2 = 20\ м^2$/сут; $a_2 = 5{,}7 \cdot 10^4 м^2$/сут, $\mu_2 = 3{,}5 \cdot 10^{-4}$, в зоне осушения $\mu_2 = 0{,}01$.

2. Для келловей-батского водоносного горизонта $km = 14{,}2\ м^2$/сут, $a = 3 \cdot 10^5 м^2$/сут, $\mu = 0{,}47 \cdot 10^{-4}$.

3. Для глин бат-байоса $K_o = 6 \cdot 10^{-6}$м/сут, $m_o = 35$м.

В граничные узловые точки модели задавались величины понижений уровня S, переведенные в потенциалы: на внешней границе области принималось условие $S = 0$, а на внутренних узловых точках сетки-модели, совпадающих с расположением дренажных устройств, величина относительного потенциала определялась исходя из глубины загружения насосов под статический уровень и пространственного расположения дренажной горной выработки. Причем для внутренних узловых точек сетки-модели значения функции напора $S(x, y, t)$, переведенные в потенциалы, задавались через дополнительные омические сопротивления $R_д$ [12, 13], учитывающие несоизмеримость расчетного блока и скважины или горной выработки.

Значения потенциалов, полученные на первом этапе (шаге по времени), Δt_1, работы дренажной системы, служили начальным условием для моделирования второго этапа продолжительностью Δt_2. Эти потенциалы задавались на концах временных сопротивлений $R\Delta t_2$, рассчитанных по формуле (3.1) для времени Δt_2.

На первом этапе электромоделирования расчетная область фильтрации разбивалась на 130 блоков размером

2800 х 2800 м каждый. Область фильтрации была детализирована на модели более крупного масштаба путем расчленения ее на фрагменты, при этом размер блока составил 1400 х 1400 м, а затем 700 х 700 м.

На втором этапе электромоделирования (Δt_2), когда дренажная система представлена горными выработками лежачего бока и кольцевой системой скважин и горными выработками, расположенными по контуру отработки залежи, область фильтрации разбивается на 137 расчетных блоков размером 11200 х 11200 м каждый. В дальнейшем для детализации картины фильтрации в системе взаимодействующих пластов с помощью фрагментирования потока были составлены модели более крупного масштаба с разбивкой в следующей последовательности: 5600 х 5600 м, 2800 х 2800 м, 1400 х 1400 м, 700 х 700 м и 300 х 300 м.

Результаты электромоделирования фильтрационного поля, возникающего при работе дренажной системы Яковлевского рудника, представлены картами изолиний понижения напоров подземных вод в карбоновом (приложение № 1) и келловейском (приложение № 2) водоносных горизонтах, вдоль расчетного профиля деформаций величины понижений напоров в указанных горизонтах показаны на рис. 3.1.

По данным электромоделирования фильтрации было установлено, что перетекание вод через глины бат-байоса происходит в радиусе примерно 5 км от условного центра депрессионной воронки в известняках карбона (в этой зоне $S \geq i_0 m_0$). На остальной площади распространения глин бат-байоса фронт пониженных напорных уровней в них (по расчету $m_p = S_{cp}/i_0$) достиг примерно половины их мощности.

3.4. Прогноз деформаций нижнего комплекса водоносных пород и дневной поверхности на период строительства Яковлевского рудника

Как следует из данных предыдущего подраздела, при проведении дренажных работ в известняках карбона

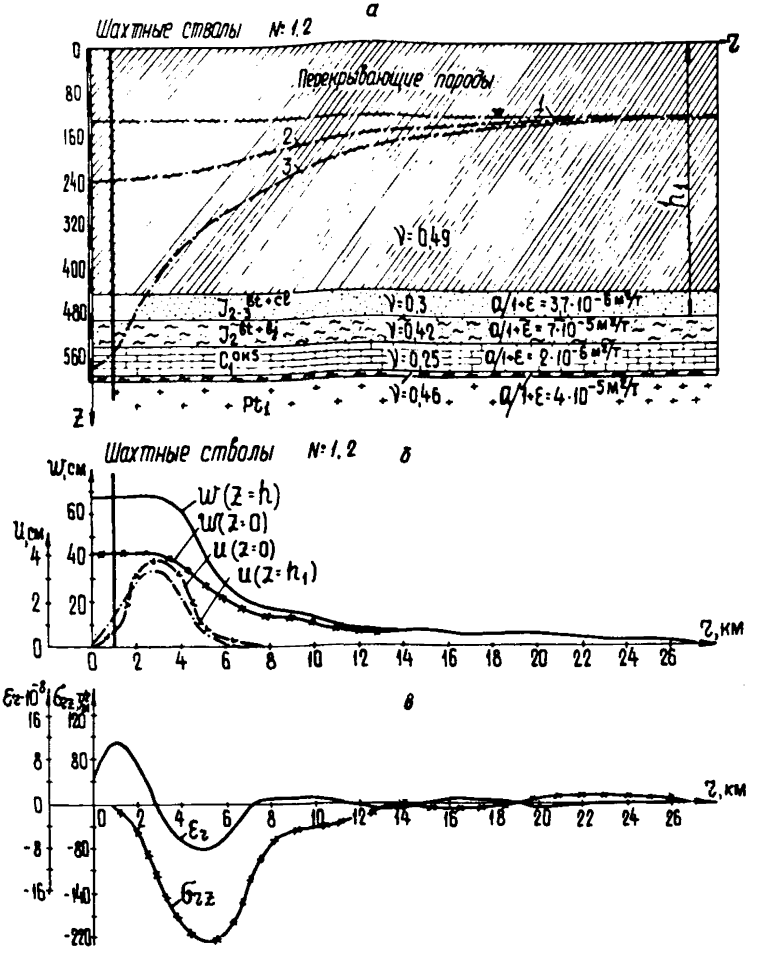


Рис.3.1. Схематизированный расчетный профиль 1 – 1 деформаций осадочной толщи пород Яковлевского железо – рудного месторождения КМА:

а – схема электромоделирования напряженно–деформи – рованного состояния пород (1 – статический уровень; 2 – прогнозный динамический уровень в келловей–батском во–доносном горизонте; 3 – прогнозный динамический уро – вень в нижнекаменноугольном водоносном горизонте) ; б – графики $\omega(z)$ и $u(z)$; в – графики σ_{zz} и ε_z при $z = h_1$.

вслед за понижением напорных уровней в нижнекаменноугольном водоносном горизонте произойдет снижение напоров в келловей-батском водоносном горизонте, отжатие поровых вод в глинах бат-байоса и каолинах, а, следовательно, и их уплотнение. При этом, как в нижнекаменноугольном, так и в келловей-батском водоносных горизонтах, будет формироваться в общем радиальный поток подземных вод, что предопределяет возможность прогнозирования напряженно-деформированного состояния нижнего комплекса водонасыщенных пород вместе с перекрывающими их породами по схеме осесимметричной деформации. Направление расчетного профиля деформации показано на рисунке прил.1, а вертикальный разрез в этом направлении - на рис. 3.1, а. Этот профиль характеризует условия деформирования пород под влиянием запроектированной на Яковлевском руднике системы осушения по направлениям от условного центра симметрии потока подземных вод к шахтным стволам № 1, 2 и 3.

На рис.3.1, а приведены деформационные характеристики водовмещающих и перекрывающих пород, необходимые для построения сетки электромодели.

Решение задачи по прогнозированию перемещений осадочной толщи пород на Яковлевском железорудном месторождении на период строительства рудника осуществлялось на электроинтеграторе БУСЭ-70 на двух сетках w и u одновременно. При этом расчет и монтаж электромодели выполнен в соответствии с рекомендациями, изложенными в п.2.2.4.

Схема разбивки области деформации толщи пород на расчетные блоки при электромоделировании осесимметричной задачи показана в прил. 3.

Результаты расчетов сопротивлений R_1 и R_2 для сеток w и u соответственно по формулам (2.26), (2.27) приведены в прил. 4 и 5, они же явились основой (схемой) для монтажа сеток-моделей w и u.

При монтаже сеток w и u сопротивления R_3 на сетке-панели электроинтегратора БУСЭ-70 размещались в соответствующих узлах в гнезда, предназначенные для установки резисторов R_4, а сопротивления R_2 - в мага-

зины для подключения R_x . Дополнительные сопротивления $R_д$ вставлялись в магазины, предназначенные для подключения резисторов R_t . В узловых точках сетки-модели, совмещенных с кровлей сжимаемого слоя, на концах сопротивлений $R_д$ устанавливалась разность потенциалов $V_{o''-o}$, определяемая для сетки w или u соответственно по формулам (2.28) и (2.29)

Величина понижения напора подземных вод в узловых точках по кровле каолинов принималась, равной снижению напоров в нижнекаменноугольном водоносном горизонте, а по кровле глин бат-байоса, в зоне, охваченной перетеканием, $z = 5$ км (расчетные узлы 1-4, см. п. 3), равной

$$S_б = \frac{S_н + S_к}{2} \quad , \tag{3.4}$$

где $S_н$ - понижение напора в заданной точке расчетного профиля в нижнекаменноугольном водоносном горизонте, м; $S_к$ - то же в келловей-батском водоносном горизонте, м.

В остальной зоне (5 км $\leq z \leq 30$ км) фронт понижен-ных напоров в глинах бат-байоса под влиянием снижения напоров в известняках карбона продвинется (по расчету) до середины слоя, а величина понижения уровня составит $0{,}5\,S_к$. Поэтому в этой зоне узлы, в которые задавалась разность потенциалов $V_{o''-o}$ на концы сопротивлений $R_д$, были смещены с кровли слоя на его середину.

Внешние граничные условия для сетки w или u формируются следующим образом:

1. Для сетки w - по почве каолинов задавалось условие равенства нулю перемещений w .

2. Для сетки u - задавалось условие равенства нулю горизонтальных перемещений по почве каолинов (в основании модели), а также на внешних вертикальных границах области деформации, то есть $u = 0$ при $z = 0$ и R.

Расчетные величины разностей потенциалов $V_{o''-o}$, пересчитанные в проценты, для сетки w и u , и результаты электромоделирования перемещений на них в первом приближении приведены соответственно в табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

Сетка W . Сводка значений разности потенциалов, задаваемых в граничные узлы модели, %, (числитель) и результатов, полученных при моделировании в первом приближении перемещений W , м (знаменатель)

11	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0,680	0,740	0,680	0,460	0,200	0,140	0,100	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0,680	0,740	0,680	0,460	0,200	0,140	0,100	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0,680	0,740	0,680	0,460	0,200	0,140	0,100	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
8	0,7	2,2	2,6	2,5	1,7	1,4	1,2	1,0	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0
	0,680	0,740	0,680	0,460	0,200	0,140	0,100	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,690	0,740	0,680	0,460	0,200	0,140	0,100	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
6	27,6	82,4	77,4	59,9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0,700	0,740	0,680	0,460	0,200	0,140	0,100	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
5	–	–	–	–	30,4	23,3	15,2	12,6	10,2	8,1	6,1	5,1	2,4	1,4	0,7	0
	0,550	0,540	0,50	0,340	0,200	0,140	0,090	0,060	0,050	0,040	0,020	0,020	0	0	0	0
4	1,6	4,8	4,2	3,0	2,2	1,7	1,1	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,1	0	0
	0,380	0,340	0,340	0,240	0,140	0,100	0,060	0,060	0,040	0,020	0,010	0	0	0	0	0
3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0,270	0,240	0,220	0,160	0,100	0,060	0,040	0,020	0,020	0,010	0	0	0	0	0	0
2	25,1	23,2	60,5	43,2	32,4	24,8	16,2	13,4	10,8	8,9	6,5	5,4	2,6	1,5	0,5	0
	0,140	0,100	0,100	0,070	0,040	0,020	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Таблица 3.2

Сетка Ц . Сводка значений разности потенциалов, задаваемых в граничные узлы модели, %, (числитель) и результатов, полученных при моделировании в первом приближении перемещений Ц , м (знаменатель)

11	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	0	0,025	0,039	0,026	0,016	0,009	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0
10	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0	0,025	0,039	0,026	0,016	0,009	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0
9	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	–	0,025	0,039	0,025	0,014	0,008	0,005	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0
8	0	2,3	3,0	7,0	7,4	3,5	3,2	2,6	2,2	1,9	1,9	1,7	1,1	0,7	1,9	0
	0	0,025	0,039	0,023	9,012	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0
7	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0	0,027	0,042	0,024	0,012	0,007	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0
6	0	65,2	98,8	93,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0	0,029	0,046	0,024	0,012	0,006	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0
5	0	–	–	–	72,3	30,1	17,3	10,0	8,8	8,0	6,0	7,2	7,2	3,4	2,8	0
	0	0,029	0,045	0,018	0,014	0,006	0,004	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0
4	0	4,7	7,2	4,1	2,7	2,3	1,7	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,3	0,2	0
	0	0,029	0,044	0,012	0,009	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0
3	0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	0	0,024	0,052	0,009	0,007	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0
2	0	47,2	72,4	40,9	26,8	23,6	16,7	7,9	6,9	6,3	4,7	5,7	5,7	3,0	2,2	0
	0	0,045	0,064	0,008	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Результаты электромоделирования на БУСЭ-70 вертикальных и горизонтальных перемещений осадочной толщи пород на Яковлевском железорудном месторождении КМА по данным третьего приближения приведены на рис. 3.1, б и в. Из рисунка видно, что в районе шахтных стволов величина вертикального перемещения поверхности, w_n, за счет растягивающих деформаций перекрывающих пород, остается гораздо меньше перемещений кровли водонасыщенных пород и составит 40 см. В то же время уплотнение водонасыщенных пород, $w_б$, в районе расположения шахтных стволов произойдет на величину, равную ~67 см. Горизонтальные смещения поверхности земли в месте заложения шахтных стволов под влиянием работы системы дренажа на строительный период Яковлевского рудника составят около 4 см.

В табл.3.3. приведены данные моделирования вертикальных и горизонтальных смещений отдельных водонасыщенных пород и дневной поверхности в районе расположения шахтных стволов.

Таблица 3.3

Породы и их возраст	Смещения на линии заложения шахтных стволов № 1, 2, 3	
	вертикальные w, см	горизонтальные u, см
Пески J_3^{cl+bt}	0,0	3,4
Глины J_3^{bt+bj}	42,0	3,4
Известняки C_1^v	15,0	3,2
Глины Pt	10,5	4,0
Осадка общая поверхности земли	$\Sigma W = 67,5$ 40,0	- 4,0

На рис. 3.1, в приведены также данные расчетов радиальных (горизонтальных) деформаций ε_z и касательных напряжений по кровле глин бат-байоса по формулам

$$\varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial z} \cong \frac{U_3 - U_1}{z_{1-3}} ; \qquad (3.5)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{1+\nu}\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial z}\right) \cong \frac{E}{1+\nu}\left(\frac{U_{0'-0''}}{z_{0'-0''}} + \frac{W_{1-3}}{z_{1-3}}\right) . \qquad (3.6)$$

Из рис. 3.1, б видно, что массив горных пород в районе расположения шахтных стволов будет испытывать деформацию сжатия, ε_z, максимальная величина которой составит приблизительно $11{,}5 \cdot 10^{-6}$. При этом формируются касательные напряжения, σ_{zz}, равные 8 т/м^2.

Полученные здесь данные о величине и характере проявления вертикальных и горизонтальных перемещений толщи осадочных пород и дневной поверхности на Яковлевском месторождении КМА существенно отличаются от данных ранее проведенных расчетов деформаций, основанных на компрессионной теории деформирования грунтов [2]. Это обстоятельство указывает на необходимость проведения натурных наблюдений за характером деформаций пород при опытно-производственном или на первом этапе строительного водопонижения и сопоставления их с расчетными данными с целью совершенствования схем деформирования обводненного массива пород.

Литература

1. *Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА), т. II. Гидрогеология и инженерная геология.* Ред. А.Т. Бобрышев, М. "Недра", 1972, (ГУЦР), 480 с.

2. Филимонов Б.А. О возможной деформации пород осадочной толщи при глубоком водопонижении на Яковлевском месторождении КМА. *Научные сообщения ИГД*

АН СССР им.А.А.Скочинского, IX, М., 1961, с.78–88.

3. Щелкачев В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959, 467 с.

4. Бочевер Ф.М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М., "Недра", 1968, 328 с.

5. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. М., "Недра", 1970, 269 с.

6. Котов И.Г., Мироненко В.А., Сердюков Л.И. О влиянии жесткости слоев, перекрывающих водоносный горизонт, на закономерности упругого режима фильтрации. ПМТФ, № 2, 1971, с.172–176.

7. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М., Физматгиз, 1963, 252 с.

8. *Biot M.A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. Journal of Applied Physic. Vol. 12, New York, 1941, p.155-164.*

9. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов. М., "Наука", 1967, 268 с.

10. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений, М., "Мир", 1964, 270 с.

11. Коноплев И.Д. Электромоделирование температурных напряжений. "Прикладная механика", т.У, вып. 7, Киев, "Наукова думка", 1969, с.50–55.

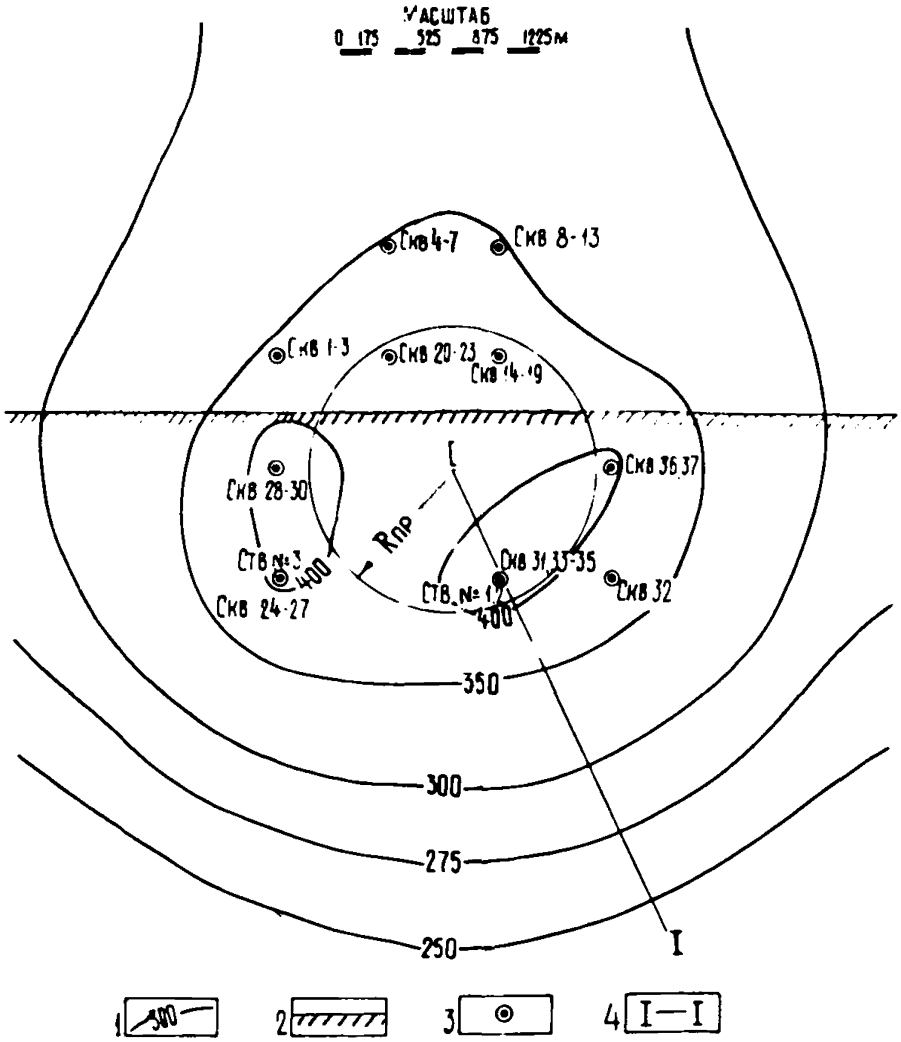
12. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов. Киев, "Высшая школа", 1976, 192 с.

13. Жернов И.Е., Шестаков В.М. Моделирование фильтрации подземных вод. М., "Недра", 224 с.

14. Сводный отчет об опытном водопонижении на Яковлевском месторождении КМА, инв.№ 207, ЦНИИгоросушение, Гуркин А.Я., Твердохлебов И.П., Белгород, 1962, 329 с.

15. Технический проект осушения шахтного поля Яковлевского рудника. Белгород, ВИОГЕМ, 1979, 321 с.

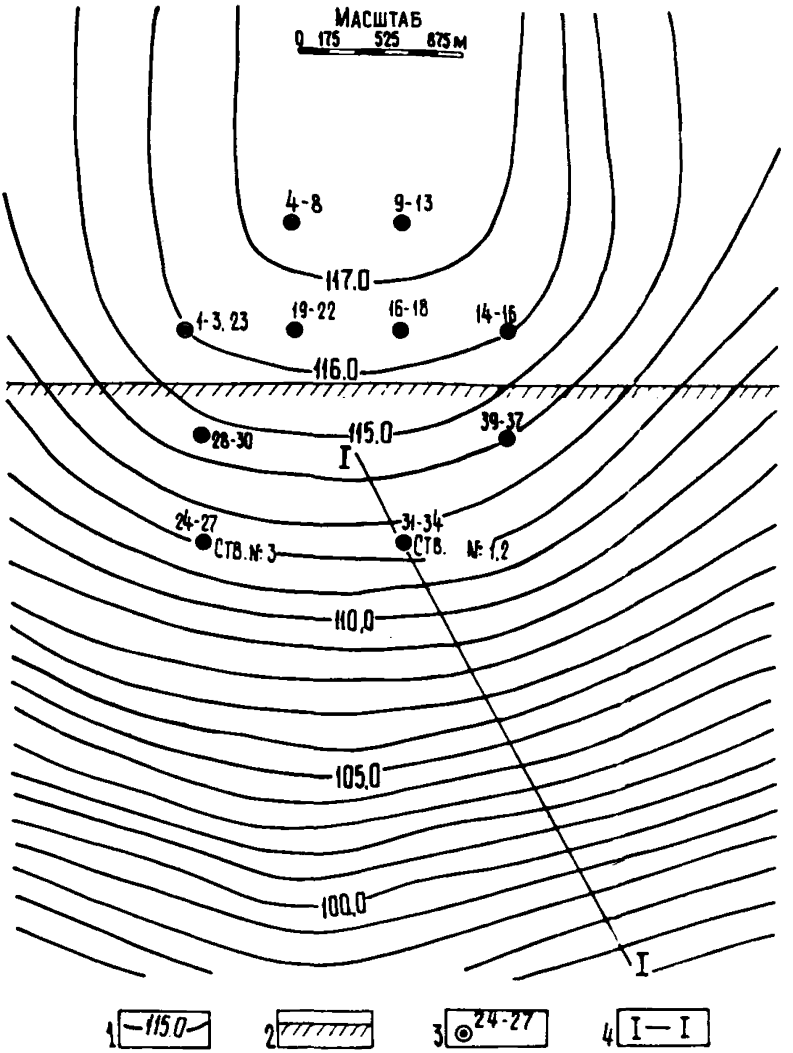
Прогнозная карта снижений напоров в известняках карбона под влиянием работы запроектированной дренажной системы на Яковлевском руднике



1 – изолинии снижений напоров в известняках карбона; 2 – граница раздела известняков карбона по проницаемости; 3 – водопонижающие скважины; 4 – расчетный профиль.

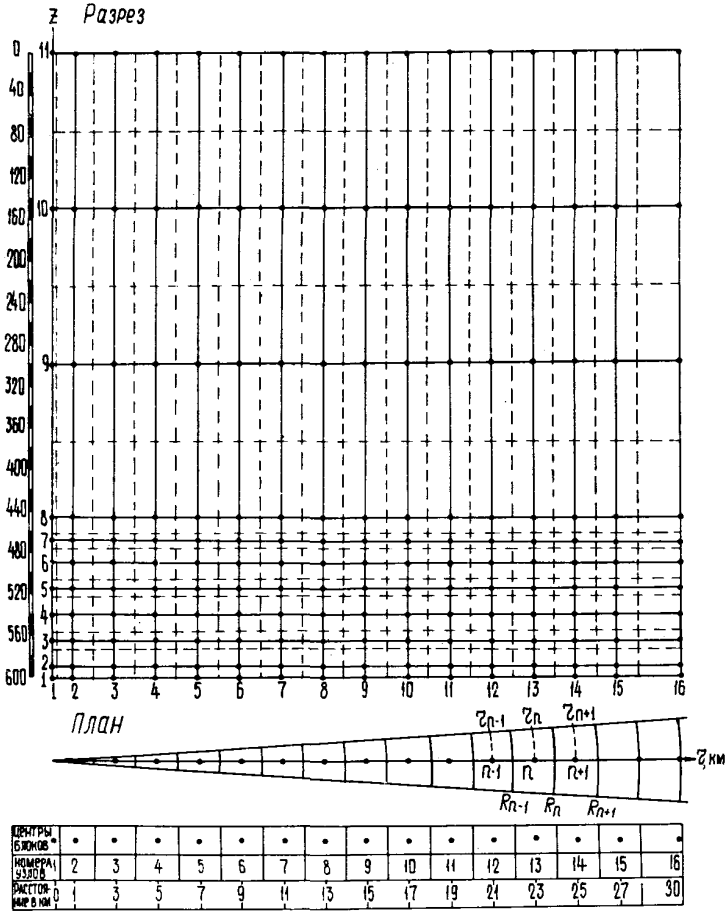
Приложение 2

Прогнозная карта снижений напоров в келловейских песках под влиянием работы дренажной системы на Яковлевском руднике

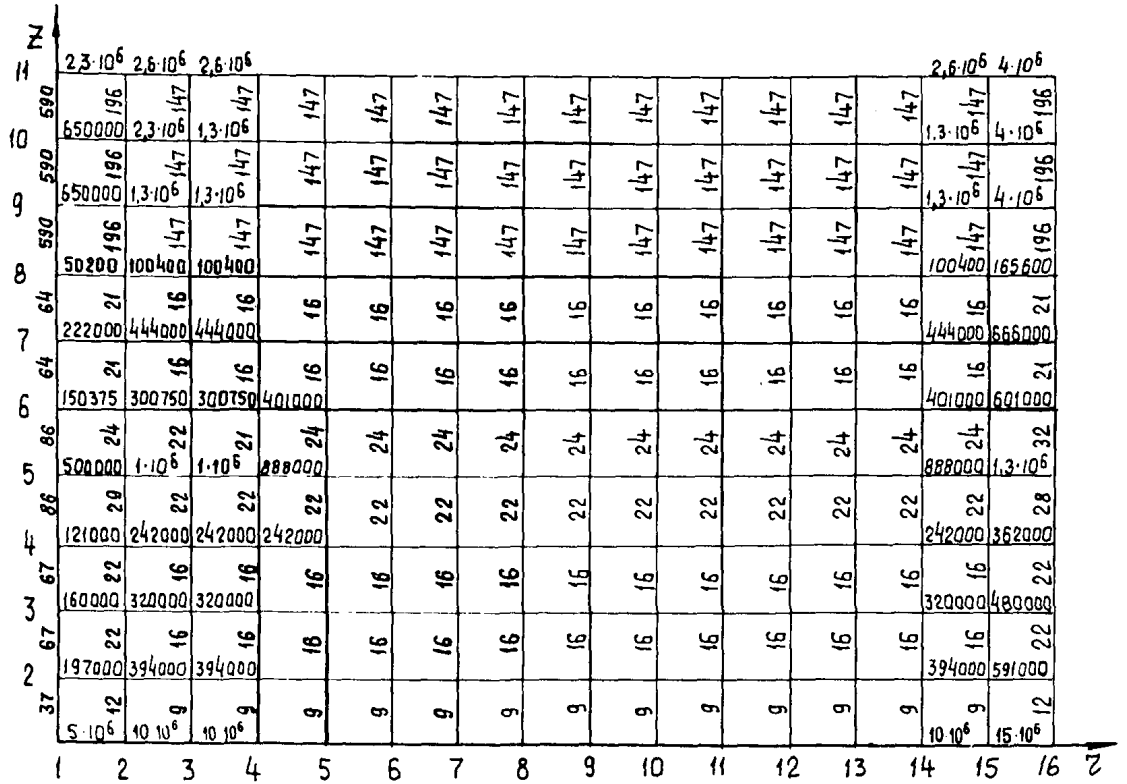


1 – изолинии снижений напоров в келловейских песках; 2 – граница раздела известняков карбона по проницае – мости; 3 – водопонижающие скважины в известняках карбона; 4 – расчетный профиль.

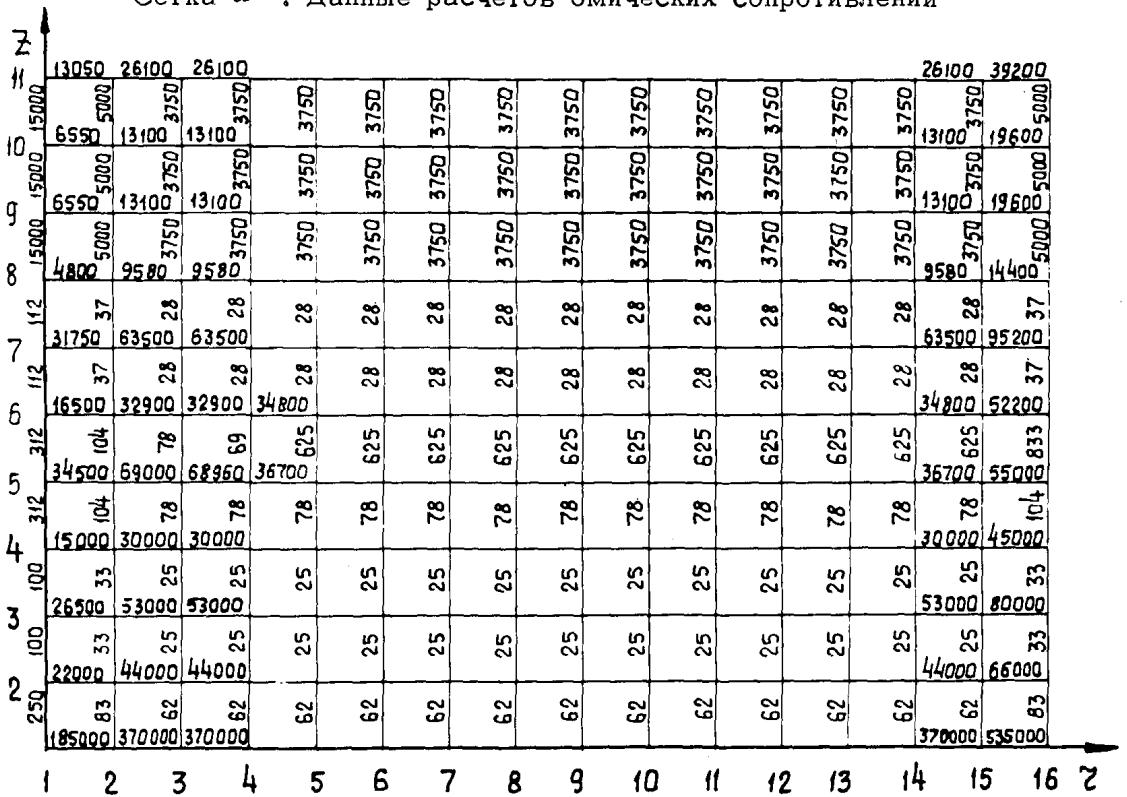
Схема разбивки на расчетные блоки
области осесимметричной деформации



Сетка W . Данные расчетов омических сопротивлений



Сетка u . Данные расчетов омических сопротивлений



СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

1. Гидрогеологические и физико-механические особенности осадочной толщи пород перспективных железорудных месторождений КМА . . 6
2. Методы оценки деформаций водонасыщенных пород и оседания поверхности земли под влиянием искусственного понижения уровня подземных вод 9
   2.1. Теоретические основы метода расчета деформаций горных пород под влиянием изменения напоров подземных вод 10
   2.2. Методы моделирования деформаций слоистых толщ на АВМ (сеточных электроинтеграторах) 15
      2.2.1. Пространственная деформация . . . 15
      2.2.2. Осесимметричная деформация . . . 20
      2.2.3. Плоская деформация (в разрезе) . . 23
      2.2.4. Расчет и монтаж сеточной электромодели 24
3. Оценка деформаций нижнего комплекса водоносных пород и дневной поверхности при проведении водопонизительных и дренажных работ в нижнекаменноугольных известняках при освоении Яковлевского железорудного месторождения КМА 27
   3.1. Мероприятия по снижению напоров в нижнекаменноугольных известняках 27
   3.2. Схематизация условий деформирования водоносных пород под влиянием их дренирования 30
   3.3. Прогноз снижения напорных уровней в нижнекаменноугольном и келловейском водоносных горизонтах 32
   3.4. Прогноз деформаций нижнего комплекса водоносных пород и дневной поверхности на период строительства Яковлевского рудника 36

Литература 43

Приложение 1. Прогнозная карта снижений напоров в известняках карбона под влиянием работы запроектированной дренажной системы на Яковлевском руднике 45

Приложение 2. Прогнозная карта снижений напоров в келловейских песках под влиянием работы дренажной системы на Яковлевском руднике. . 46

Приложение 3. Схема разбивки на расчетные блоки области осесимметричной деформации. 47

Приложение 4. Сетка w . Данные расчетов омических сопротивлений. 48

Приложение 5. Сетка u . Данные расчетов омических сопротивлений. 49

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ОСУШЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Научный редактор канд.техн.наук Ю.В. Пономаренко

Литературный редактор Л.А. Порубай
Технический редактор А.Г. Воронцова
Корректор И.А. Соляр
Художники В.А. Выродов, И.Г. Чернобровкина

Подписано к печати 5 апреля 1978 года.
Объем 2,5 уч.-изд. л. Тираж 300 экз. Заказ № 224.
Ротапринт ВИОГЕМ, Белгород, Б.Хмельницкого, 86.
Цена 35 коп.

gost.e-ecolog.ru