*Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLIV, вып. 2, 1962 г.*

# К МЕТОДИКЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ОСУШЕНИИ САФОНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Н. Г. Паукер*

При проектировании и осуществлении осушения месторождений полезных ископаемых необходимо учитывать и использовать опыт уже проведенного осушения на аналогичных или близких к ним месторождениях. Одним из таких объектов, интересным в гидрогеологическом отношении, по которому уже накоплен известный опыт осушения, является Сафоновское месторождение бурых углей и огнеупорных глин Смоленской области. Разведка и изучение его гидрогеологических условий начались в послевоенные годы и продолжались до 1950 г. Некоторые дополнительные работы проводились и позже — вплоть до 1962 г. На основании разведочных работ запроектировано более 8 шахт. Строительство первых шахт началось в 1949 г. В строй действующих предприятий последовательно вступали шахты: 1 — в 1953 г., 2 — в 1954 г., 3 и 4 — в 1956 г., 8 — в 1957 г., 6 — в 1958 г., 7 — в 1959 г. В конце 1959 г. закончено строительство шахты 5, которая в настоящее время предназначается только для добычи огнеупорной глины.

Вследствие тяжелых горногеологических условий разработки себестоимость бурого угля и глины на Сафоновском месторождении высока. Немалое влияние на это оказывает обводненность горных выработок. Месторождение приурочено к полосе нижнекаменноугольных отложений юго-западной части Подмосковного бассейна и входит в пределы Дорогобужского угленосного района. Согласно разрезу Смоленской структурной скважины, кристаллический фундамент находится примерно на глубинах 1000 *м*. Выше залегают песчаники протерозоя. На глубинах 800—880 *м* расположены песчаные морские отложения нижнего кембрия (гдовские слои). Их перекрывают глины и аргиллиты ламинаритовых слоев (620—800 *м*) с прослоями песчаников. На гдовские слои трансгрессивно налегают лагунно-морские отложения живетского яруса, представленные чередованием мергелей, доломитов и глин с пластами гипса и ангидрита в середине и преобладанием песчаных пород в верхней части. Общая мощность всей толщи 320 *м*. На глубинах примерно 100—300 *м* залегают отложения франского яруса, внизу представленные мелкозернистыми и тонкозернистыми песками, а выше — карбонатными породами (известняками, доломитами, мергелями, пестроцветными глинами с пропластками гипса в верхней части). Далее расположены осадки фаменского яруса, выраженные преимущественно морскими карбонатными породами, среди которых преобладают доломиты.

В Нелидовской структурной скважине (в 125 *км* севернее Сафонова) в живетских отложениях на глубинах 740—770 *м* встречен довольно мощный пласт каменной соли. Такая же соль вскрыта скважинами в г. Вязьме и во многих пунктах южного крыла Подмосковного бассейна. Следовательно, и в районе Сафоново возможно наличие в среднем девоне лагунных соленосных фаций. Это, в свою очередь, накладывает отпечаток на характер гидрохимического разреза района и отличает его (по гидрохимической зональности) от смежных районов Московского и Днепровско-Донецкого артезианских бассейнов [3]. Однако на водоносных горизонтах верхнего девона и карбона влияние соленосных отложений описываемого района, так же как и Нелидовского, не сказывается, так как выше пласта соли имеется надежная «покрышка» (до 100 *м*) из глинистых пород.

Непосредственно на Сафоновском месторождении верхи фаменского яруса (озерско-хованские слои данково-лебедянского подъяруса) полностью не пройдены скважинами. Разведочные, наблюдательные и водопонижающие скважины обычно вскрывали девонские отложения на 8—15 *м*, иногда 30 *м* и более. И только в водопонижающих скважинах 32 (поле шахты 4) и 15 (поле шахты 8) доломиты $D_3fm_2$ *dn — lb* пройдены соответственно на 68,8 и 70,4 *м*. Последнюю величину условно можно принять за мощность доломитового горизонта данково-лебедянского подъяруса.

Доломиты неоднородны по простиранию, по степени трещиноватости и кавернозности, но крупных карстовых полостей в них не встречено.

На доломитах без существенного несогласия залегает глинисто-мергельная толща лихвинского подъяруса $C_1t$ *l* с прослоями известняков, доломитов и песчаников. Поверхность лихвинских отложений сильно эродирована. На размытой поверхности осадков турнейского яруса, а местами и на доломитах девона, залегает песчано-глинистая толща визейского яруса, включающая сталиногорский горизонт, тульский горизонт и нижнюю (песчаную) часть алексинского горизонта.

Тектоническое строение Дорогобужского района, как и всего западного крыла бассейна, характеризуется общим пологим падением палеозойских пород к центральной части Московской синеклизы. На фоне общего моноклинального залегания наблюдаются положительные и отрицательные структуры второго и третьего порядков. Сафоново-Ельнинское, относительно крупное тектоническое поднятие [8], расположено почти меридионально. Площадь его свыше 650 *км*$^2$. В границах его находятся Сафоновское и Дорогобужское буроугольные месторождения.

К востоку от этого поднятия расположена удлиненной формы депрессия с отметками кровли доломитов на 20 *м* ниже, чем в Сафоново-Ельнинском поднятии.

В пределах отдельных, относительно крупных поднятий имеются мульдообразные понижения третьего и четвертого порядков. Так, например, на поле шахты 5 разведочными скважинами оконтурена мульда в залегании пород девона и карбона с еще более низким положением кровли доломитов, чем в упомянутой ранее депрессии, но площадь этой мульды составляет всего 2,2 *км*$^2$. Крутизна ее склонов достигает 55 *м* на 1 *км*. Такие мульды весьма затрудняют осушение шахтных полей.

В пределах отдельных шахт разведочными скважинами, особенно горными выработками, выявлена волнистость в залегании угольных пластов, а также в подстилающих и покрывающих породах. Отмечены местные вздутия пластов, их смещения, резкие выклинивания и другие нарушения, причинами которых являются не только колебательные движения земной коры, но и воздействия ледника (гляциодислокации),

карстовые и эрозионные процессы и прочие экзогенные явления, неоднократно проявлявшиеся в течение всей геологической истории развития района.

Большое значение для понимания геологических и гидрогеологических условий района имеет изучение развития древней и современной гидрографической сети. Как известно, к началу четвертичного периода здесь была выработана система долин, глубоко врезанных в коренные породы. Впоследствии они заполнялись рыхлым песчано-глинистым материалом в разные стадии оледенения и в межледниковья. Современные долины по глубине вреза значительно уступают доледниковым.

Таким образом, Сафоновское месторождение характеризуется сложными гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями: 1) наличием в геологическом разрезе нескольких водоносных горизонтов, приуроченных к различным по литологическому составу и возрасту отложениям; 2) напорным характером большинства горизонтов; величина напора (от водоупора) достигает для отдельных горизонтов 7—10 *ати,* вследствие чего проходка горных выработок и очистные работы сопряжены с большими трудностями и невозможны без специальных осушительных мероприятий; 3) гидравлической взаимосвязью водоносных горизонтов в местах их сочленения с четвертичными обводненными отложениями (в древних депрессиях), что в целом представляет собой сложный водоносный комплекс; 4) перемежаемостью в разрезе и по площади средне-, мелко- и тонкозернистых песков (плывунного характера) с алевритами, глинами и углистыми породами, в разной мере обводненными и с различной устойчивостью при обнажении; невыдержанностью залегания пород, их фациальной изменчивостью, иногда весьма сложными их взаимоотношениями, связанными с условиями образования, тектоническими и псевдотектоническими явлениями внутриформационными и региональными размывами, — все это затрудняет проектирование и проведение выработок по заданному направлению и приводит к прорывам воды и плывунов; 5) достаточной обеспеченностью основных водоносных горизонтов атмосферными осадками и поверхностными водами, что вызывает необходимость систематической борьбы с водопритоками в шахтах, преимущественно за счет динамических ресурсов; 6) широким распространением различных по физико-механическим свойствам глинистых пород невысокой степени литификации (в сталиногорском и других горизонтах), предопределяющим возможность пучения глин и размягчение («раскисание») их при увлажнении [5]; для таких пород, особенно пластичных глин, характерно общее понижение несущей способности и устойчивости их в подземных выработках; в результате происходит деформация крепи капитальных, подготовительных и очистных выработок.

По общему гидрогеологическому положению описываемый район приходится на северную часть Днепровского артезианского бассейна — на границе его с Московским артезианским бассейном. В разрезе палеозоя имеется несколько водоносных комплексов. Нижние из них на обводненность месторождения влияния не оказывают. Поэтому описание водоносных горизонтов достаточно начать с верхнедевонского, приуроченного к доломитам, $D_3fm_2$ *dn — lb.*

Этот водоносный горизонт широко распространен и наиболее водообилен. Мощность его можно принять равной 70 *м.* Верхним водоупором служит толща глин и мергелей лихвинского подъяруса и глинистые породы сталиногорского горизонта. Питание осуществляется за счет перелива воды из вышележащих горизонтов через так называемые «окна» в водоупорах и путем напорной фильтрации сквозь относительные водоупоры на участках, где рельеф дневной поверхности имеет повышенные

отметки. На таких участках уровень воды в вышележащих горизонтах выше, чем в доломитовом, что и создает предпосылку для вертикальной фильтрации и перелива воды вниз. Обычно это участки, где берут начало мелкие речки и овраги, затем отдельные возвышенности и, наконец, более крупные водораздельные пространства. В долинах современных рек (в среднем и нижнем их течении) создаются предпосылки для разгрузки доломитового горизонта сквозь вышележащие породы. На Сафоновском месторождении, например, судя по конфигурации гидроизопьез 1949 г., небольшая разгрузка, по-видимому, происходила в долине р. Вопец — на участке поля шахт 1 и 2 и ниже по течению.

Значительной областью разгрузки для данного водоносного горизонта служит долина р. Днепра, по направлению к которой наблюдается общее снижение пьезометрической поверхности.

Водообильность доломитов в силу их неравномерной трещиноватости, закарстованности и литологической невыдержанности изменяется в значительных пределах, причем иногда смена различных зон водопроницаемости происходит довольно резко по вертикали и простиранию.

По данным опробования разведочных скважин 1947—1950 гг., коэффициент фильтрации $k$ колеблется от 0,1 до 39 *м/сутки* (расчет $k$ в большинстве случаев производился по общеизвестной формуле Дюпюи, но вместо полной мощности водоносного горизонта учитывалась только вскрытая его часть). При опробовании скважин для водоснабжения (так называемых артезианских) и водопонижения получены, как правило, более высокие показатели водообильности. Такие скважины бурились по доломитам бóльшим диаметром и на бóльшую глубину, чем разведочные. Откачка воды производилась более мощными насосами. В течение откачки закольматированные трещины и каверны могли очиститься от глинистого материала лучше, чем при опытных откачках во время разведочных работ. Все это влияло на выбор исходных величин при проектировании осушительных работ. Если учитывать все полученные значения $k$, то среднеарифметическая его величина из 46 расчетов составит около 13 *м/сутки*. Но если основываться только на результатах более обстоятельных откачек, то по 26 расчетам среднее значение коэффициента фильтрации составит 20 *м/сутки*. Средний удельный дебит скважины (при более надежных откачках) около 3,6 $м^3/ч \cdot м$.

На сводном геолого-гидрогеологическом разрезе (рис. 1) приведены необходимые данные для всех вышележащих водоносных горизонтов, в том числе мощности водоносных слоев $M$, удельные дебиты скважин $q$ и коэффициенты фильтрации водоносных пород $k$. По химическому составу воды всех горизонтов, включая и доломитовый, более или менее однотипны, что свидетельствует об общности условий питания и наличии связи между водоносными слоями и горизонтами. Степень этой связи зависит от местных условий того или иного участка месторождения, особенно в его периферической части.

Каждое шахтное поле имеет свои гидрогеологические и инженерно-геологические особенности, что необходимо иметь в виду при проектировании и осуществлении горнопроходческих и осушительных работ, особенно по надугольным водоносным горизонтам.

С учетом геологической и гидрогеологической обстановки проект вскрытия и разработки месторождения предусматривал комплекс мероприятий по осушению обводненных пород. В процессе осушения характер этих мероприятий и представление о степени влияния тех или иных факторов на обводненность шахтных полей иногда изменялись. Принципиальная схема осушения заключалась в следующем. В период вскрытия шахтного поля требовалось понизить пьезометрический уровень в над-

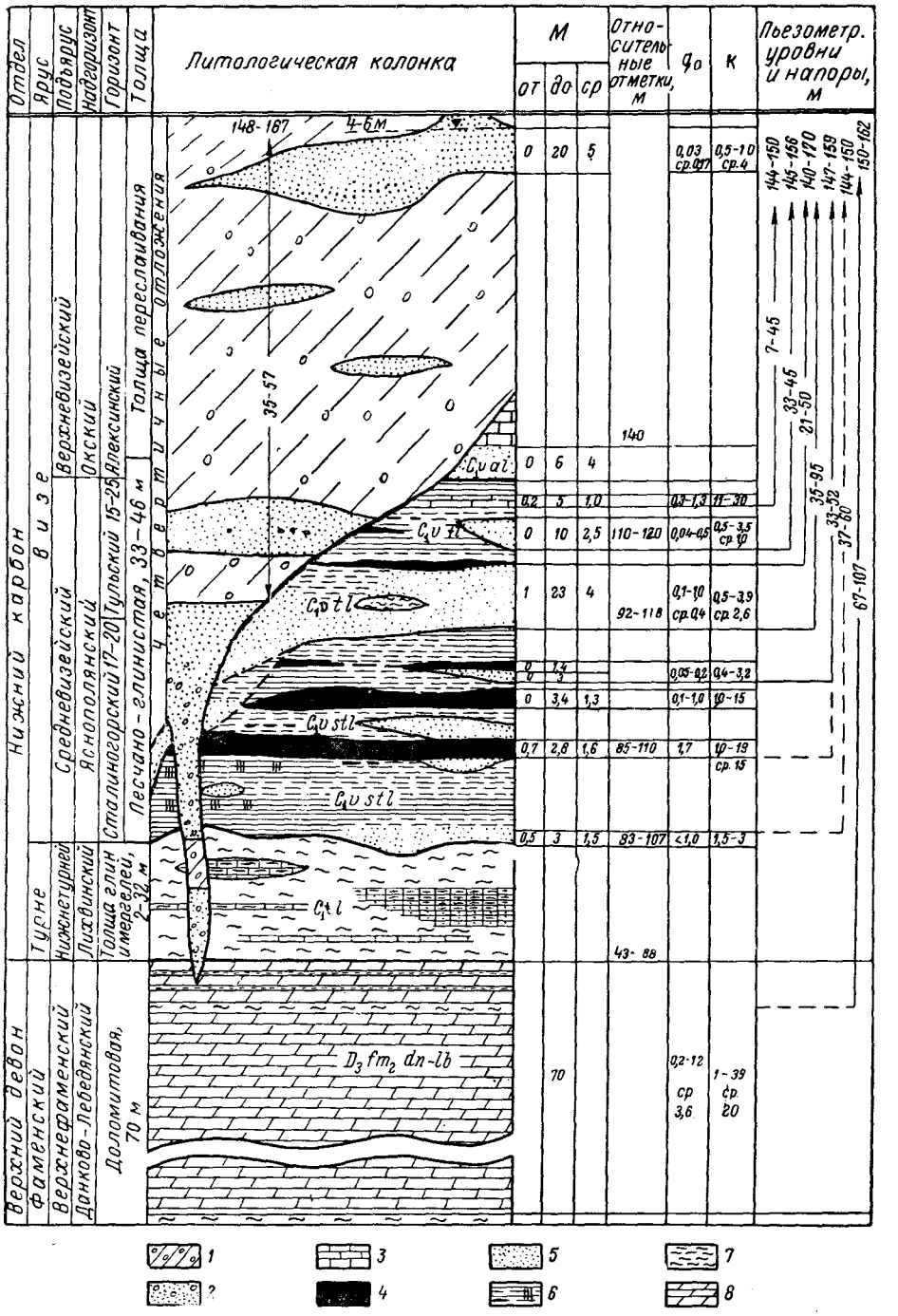



Рис. 1. Сводный стратиграфо-гидрогеологический разрез Сафоновского месторождения.

*1* — суглинки и глины моренные; *2* — пески от разнозернистых до грубозернистых с гравием, щебнем, галькой; *3* — известняки; *4* — угли бурые, иногда водоносные; *5* — пески мелко-и тонко зернистые, местами плывунного характера; *6* — глины пластичные, песчаные, углистые и полусухарные; *7* — глины пластичные, сухарные и доломитизированные (лихвинского подъяруса) с прослоями мергелей, известняков, известковистых песчаников; *8* — доломиты и доломитизированные известняки, иногда с прослоями доломитовых глин.

угольных водоносных горизонтах на максимально возможную величину водопонижающими скважинами с поверхности. Затем, по мере проходки околоствольных выработок и штреков главных направлений, следовало вводить в действие осушительные устройства, в основном забивные фильтры, до полного осушения надугольных песков. Таким образом, для надугольного горизонта предусматривалась комбинированная система осушения — поверхностный и подземный способы.

Для частичного снижения напора в доломитовом водоносном горизонте предусматривался только поверхностный способ осушения — водопонижающими скважинами, задаваемыми по контуру околоствольных выработок, по линиям штреков главных направлений и отдельными группами на очистных участках.

В настоящей статье невозможно дать подробный анализ осушения по всем горизонтам. Ограничимся только результатами водопонижения в доломитах, интересных, во-первых, с точки зрения сопоставления проектных решений с фактическим положением на данном месторождении и, во-вторых, для решения некоторых методических вопросов вообще.

О необходимости снижения напора в этом горизонте существовали и существуют различные мнения. В процессе разведки шахтных полей породы лихвинского и сталиногорского возрастов (от доломитов до подошвы пласта «Нижний») в целом оценивались как благонадежные с точки зрения противодействия напору. Такое представление основывалось на том, что в разрезе всей разделяющей толщи, мощностью обычно свыше 10—15 *м*, наряду с обычными глинами залегали и такие относительно крепкие породы, как мергели, прослои доломитизированных известняков и глинистых доломитов, камнеподобные сухарные глины и т. п. Вся эта толща пород, считалось, не может быть прорвана или продавлена в выработку гидростатическим давлением даже в 8—10 *ати*.

Расчет устойчивости разделяющих пород производился по методике В. Д. Слесарева с дополнениями В. И. Владимирского и Л. Г. Кальмана. В расчетную формулу для безопасного пролета горной выработки подставлялась величина всей мощности разделяющих пород и некоторая усредненная величина временного сопротивления на растяжение. Для большинства пунктов месторождения по такому расчету величина допустимого гидростатического напора была выше фактического, и, следовательно, понижения напора не требовалось.

Изучение свойств глинистых пород Сафоновского, Нелидовского и Селищенского месторождений западного крыла Подмосковного бассейна в 1949—1950 гг. позволило выявить некоторые особенности поведения подугольных глин и дать более обоснованную характеристику физико-механических свойств, в частности по сопротивляемости их растяжению [7]. На основе проведенных испытаний, используя ту же методику оценки устойчивости пород, рекомендовалось в условиях Сафоновского месторождения производить частичное снижение напора воды в доломитах.

В рабочих проектах по строительству и осушению шахт 3, 4 и 5, разработанных Ленгипрошахтом, уже предусматривалось частичное снижение напора, но главным образом при проходке околоствольных выработок и водосборников, поскольку эти выработки наиболее глубоко заглублялись в глинистые породы.

Действительно, сооружение водосборников на шахтах Сафоновского месторождения прошло без осложнений со стороны доломитового горизонта, причем на шахтах 1 и 2 благополучная проходка этих выработок осуществлена даже без частичного снижения напоров. Поэтому некоторые шахтостроители и эксплуатационники считали, что водопонижение

вообще необязательно. Однако случаи прорывов вод из доломитов на шахтах Селищенского и Нелидовского месторождений в 1949—1954 гг. заставили обратить более серьезное внимание на изучение строения подугольной толщи, на свойства различных литологических разностей и методику расчета безопасных напоров. В 1953—1955 гг. кафедра гидрогеологии Ленинградского горного института занималась этими вопросами для Нелидовского и Дорогобужского угленосных районов. Путем моделирования и анализа материалов по фактическим прорывам подземных вод в шахтах Подмосковного бассейна была разработана методика расчета критических и допустимых гидростатических напоров для выработок различного очертания (в плане) при разных мощностях, литологических типах, влажностях и плотностях пород [10].

При исследовании было обращено внимание и на структурные особенности глинистых пород. Отмечено, что в толще доломитизированных, сухарных, известковистых глин и мергелей часто наблюдается мелкая сеть трещин — от очень тонких до хорошо заметных на глаз. По трещинам может фильтроваться вода и передаваться гидростатическое давление на вышележащие водоупорные глины, чаще пластичные их разности. Последние собственно и являются «работающим» слоем, принимающим на себя воздействие гидростатического напора. Мощность этого слоя, составляющая иногда сравнительно небольшую часть от общей мощности разделяющей толщи, и следует учитывать при расчете допустимых напоров.

Соответствующие расчеты показали, что в условиях Сафоновского месторождения, особенно при очистных работах, необходимо производить снижение напора до безопасных величин, учитывая перечисленные выше факторы.

Необходимость снижения напора в доломитах полностью подтвердилась при разработке западного крыла шахты 4 (январь 1955 г.) и строительстве шахты 6 (сентябрь 1955 г.), когда возникли крупные прорывы воды с тяжелыми последствиями для шахт. Ликвидация последствий прорывов могла быть осуществлена только под защитой водопонизительных установок. Собственно с 1955 г. и началось систематическое проведение водопонизительных работ на месторождении. До этого отдельные водопонижающие скважины (например, на поле шахты 3) действовали непостоянно, не могли создать устойчивой депрессионной воронки на смежных участках и, таким образом, не обеспечивали нормальной работы на шахте. При прорывах 1955 г. первоначальный пьезометрический уровень не был почти снижен.

В 1956 г. Ленгипрошахтом был составлен проект комплексного осушения доломитов для восьми шахтных полей южной части месторождения. В этом проекте использована новая методика расчета безопасных напоров, учтены неоднородность разделяющей толщи и фактические величины сопротивляемости глин гидростатическому давлению. Составлена была карта изолиний допустимых напоров для всех шахтных полей.

Согласно этому проекту, в течение 29-летнего периода отработки шахтных полей должно было действовать до 58 водопонижающих скважин. В действительности водопонижение осуществлялось далеко не по проекту. Вначале депрессионные воронки были созданы на аварийных участках шахт 4 и 6. В марте 1956 г., после ввода в действие новых скважин на поле шахты 8, эти воронки расширились и углубились. В это время действовало 13 скважин с суммарным дебитом 1440 $м^3/ч$. Водопонижающие скважины снизили первоначальный пьезометрический уровень (по сравнению с 1949 г.): на 10—16 $м$ — в районе шахты 7:

на 22—50 *м* — на поле шахты 3; на 15—35 *м* — на поле шахты 5; на 18—25 *м* — на поле шахты 2; на 20—28 *м* — на поле шахты 1. Радиус общей депрессионной воронки составил около 11 *км*.

На сентябрь 1956 г. на шахтах 3, 4, 6 и 8 находилось в работе 25 скважин, оборудованных насосами АТН-14 с суммарным дебитом 3000 $м^3/ч$. К этому времени на участке прорыва шахты 4 уровень вод доломитов находился ниже почвы угольного пласта на 13 *м*, на шахте 6 — на 4 *м*, а на шахте 8 — всего на 10—15 *м* выше угольного пласта. У околоствольного двора шахты 7 уровень снизился на 20 *м* от статического. Однако депрессионная поверхность из-за частого отключения насосов была неустойчива.

К августу 1958 г. в работе находилось уже 32 скважины за счет ввода в действие водопонизительных установок на строящихся шахтах 5 и 7. Но общий дебит не превышал (как и два года назад) 3000 $м^3/ч$, что свидетельствовало о заметном взаимодействии скважин. Последнее выражалось не только в увеличении понижений уровня, но и в уменьшении среднего дебита одной скважины.

В дальнейшем работа водопонижающих скважин была очень неравномерной, число одновременно действовавших скважин постепенно уменьшалось. На сводном графике уровней воды в наблюдательных скважинах отмечались непрерывные скачки. При одном из таких подъемов пьезометрического уровня воды доломитов проникли в околоствольные выработки шахты 5.

Остановимся более подробно на анализе результатов осушения доломитов в 1959 г. В это время имелось 52 скважины со средней глубиной 129 *м* (98—165 *м*). Водопонижающие скважины были оборудованы насосами АТН-14, АТН-10, ПМНЛ-100×100, ПМНЛ-60×150 и АПВ-8. Из общего числа оборудованных скважин в одновременном действии в начале года находилось 23, а к концу — только 14. Работали эти скважины неравномерно. За весь 1959 г. отработано 226 скважино-месяцев и откачано в общей сложности 18 *млн.* $м^3$ воды, в том числе скважинами на поле строящейся шахты 5 — 4,2 *млн.* $м^3$. Производительность одной скважины в среднем около 108 $м^3/ч$.

На 1 *т* добычи угля всего приходилось 14,3 $м^3$ воды, а без шахты 5 величина коэффициента водообильности (по доломитам) составила 10 $м^3/т$. Общие затраты на откачку воды из доломитов выразились суммой в 3193 тыс. руб. (в масштабе цен, действовавшем до 1/I 1961 г.); стоимость откачки 1 $м^3$ воды в среднем 18 коп., стоимость откачки на 1 *т* добытого угля — 1 р. 70 к. (с учетом шахты 5 — 2 р. 20 к.). Коэффициент относительной стоимости осушения (только по водопонижению в доломитовом горизонте) в целом по тресту Смоленскуголь составил 1,5%, а с учетом шахты 5 — до 2,2%.

В результате действия водопонижающих скважин сформировалась довольно глубокая, но неправильная по конфигурации депрессионная воронка с максимальными понижениями (местными воронками) на участке околоствольных выработок шахты 5 и у очага прорыва шахты 4, где отметки пьезометрического уровня временами снижались соответственно до 70 и 86 *м*. Таким образом, понижения уровня от статического положения выражались величинами 83 и 72 *м*.

Однако в отдельные месяцы уровни во всех наблюдательных скважинах сильно колебались. В частности, по указанным выше шахтам они поднимались до отметок соответственно 100 и 103 *м*, т. е. на 35 и 7 *м* выше подошвы угольного пласта (по шахтам 5 и 4).

В период резкого нарушения нормальной работы водопонижающих скважин (июнь и июль 1959 г.) на отдельных участках шахт 2, 7 и 8

уровни поднимались на 20—26 *м* выше подошвы угольного пласта, а на шахтах 1,3 и 5 — на 15—20 *м*.

Следовательно, в течение всего 1959 г. напоры вод доломитов в подавляющем числе случаев были выше подошвы угольного пласта в подготовительных выработках и на очистных участках. Аналогичная картина наблюдалась и в 1960 г. Тем не менее прорывов воды из почвы выработок не происходило. Это подтверждает положение о том, что на Сафоновском месторождении нет необходимости снижать напор в доломитах на всей площади разрабатываемых участков ниже подошвы угольного пласта. Вместе с тем нельзя допускать, чтобы остаточные напоры были выше допустимых (безопасных) величин, учитывающих сопротивляемость защитного слоя водонепроницаемых глин в соответствующих участках месторождения.

Из-за ненормальной работы водопонизительной установки в отдельных точках остаточные напоры временами были выше допустимых: на шахте 1 на 2—6,5 *м*, на шахте 2 на 7—12 *м*, на шахте 3 на 9—24 *м*, на шахте 7 на 15—19 *м* и на шахте 8 на 5—7 *м*.

В 1960 г., особенно в начале сентября, в ряде случаев, уровни также находились выше отметок допустимых напоров. В связи с этим работу всей водопонизительной установки требовалось организовать так, чтобы в последующие годы на разрабатываемых участках отметки пьезометрических уровней в соответствующих пунктах шахтных полей не превышали допустимых величин.

Сопоставим фактическое положение (в нормальные периоды работы водопонизительной установки) с тем, которое должно быть при соблюдении требования о снижении напора в доломитовом горизонте на 2—3 *м* ниже подошвы выработок. Согласно расчетам (проект Ленгипрошахта 1958 г.), такое снижение обеспечивалось в 1959 г. работой 48 водопонижающими скважинами с суммарным расходом 3840 $м^3/ч$, т. е. с откачкой из доломитов за год 33,6 *млн.* $м^3$ воды.

По данным того же института, стоимость откачки 1 $м^3$ воды (только по эксплуатационным расходам) составляет 22 коп. (в масштабе цен действовавшем до 1/I 1961 г.). Следовательно для откачки 33,6 *млн.* $м^3$ потребовалось бы 7,39 млн. руб., т. е. на 4,2 млн. руб. больше, чем израсходовано в 1959 г. Если принять фактическую стоимость откачки 1 $м^3$ воды 18 коп., то для снижения напора до почвы пласта потребовалось бы затратить вдвое больше средств, чем израсходовано в 1959 г. Аналогичное положение было и в 1960 г.

Таким образом, выполнение требования полного снижения напора в доломитах резко увеличивает себестоимость добычи. Чтобы контролировать работу водопонизительной установки и выявлять участки депрессионной поверхности, где фактически напоры выше допустимых, необходимо построить план гидроизопьез на какой-либо определенный момент времени и сопоставить его с картой допустимых напоров. Такая карта составлена для всего месторождения в 1956 г. и уточнена нами для отдельных шахтных полей на основе дополнительных данных (скважин доразведки, испытания монолитов глин и др.). Как известно, построение плана гидроизопьез обычным способом возможно, если есть достаточное число фактических замеров уровней по наблюдательным скважинам.

На всем Сафоновском месторождении было пробурено достаточное число наблюдательных скважин, но большинство их вскоре по недосмотру вышло из строя. К октябрю 1959 г. сохранилось (по доломитовому горизонту) 18 скважин, но по площади они распределены неравномерно, поэтому по ним почти невозможно построить изолинии сложной

пьезометрической поверхности. Необходимо достаточно четко представить, какова эта поверхность, какими гидрогеологическими параметрами она характеризуется, а уже затем решить вопрос, как управлять депрессионной воронкой, чтобы создать в определенное время на защищаемых участках требуемое понижение напора.

Для решения поставленных вопросов в течение 7—8 октября 1959 г. производились замеры расходов по всем действовавшим в то время скважинам и одновременно замеры уровней в наблюдательных скважинах. Результаты замеров приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Поле шахты | Водопонижающие скважины | | | Наблюдательные скважины | |
|---|---|---|---|---|---|
| | № | мощность вскрытых доломитов, *м* | дебит, $м^3/ч$ | № | относительные отметки уровня, *м* |
| 7 | 15 | 40,8 | 175 | 14 | 120,7 |
| 7 | 16 | 26,8 | 180 | 17 | 118,4 |
| 7 | 14 | 26,5 | 75 | 20 | 129,8 |
| 6 | 23 | 18,1 | 180 | 12 | 113,7 |
| 6 | 25 | 22,3 | 165 | — | — |
| 4 | 231 | 17,5 | 180 | 240 | 90,2 |
| 4 | 248 | 19,0 | 80 | — | — |
| 5 | 28 | 52,3 | 100 | 23 | 84,1 |
| 5 | 11 | 11,4 | 60 | 15 | 91,5 |
| 5 | 21 | 10,1 | 30 | 18 | 106,0 |
| 5 | 22 | 10,0 | 20 | 19а | 88,5 |
| 5 | 32 | 47,4 | 100 | 30вп | 93,4 |
| 5 | 33 | 52,3 | 100 | 31вп | 90,9 |
| 5 | 34 | 49,0 | 80 | 9 | 83,9 |
| Городской водозабор | — | 30 | 200 | — | — |
| 8 | 9 | 16,8 | 170 | 10 | 123,1 |
| 8 | — | — | — | 22 | 122,4 |
| 8 | — | — | — | 23 | 123,4 |
| 1 | — | — | — | 348 | 112,4 |
| 2 | 343 | 16,5 | 185 | — | — |
| 3 | — | — | — | 29 | 113,5 |
| 3 | — | — | — | 30 | 120,3 |

На основе этих данных можно выявить общую закономерность, связывающую понижения и дебиты в приведенных выше скважинах, и по этой закономерности рассчитать пьезометрические уровни в дополнительных точках, необходимых для построения депрессионной воронки.

Как известно, при проектировании водопонизительных установок для расчета взаимодействующих скважин нередко используют уравнение Форхгеймера. Для нахождения понижений в интересующих точках применяют это уравнение, зная средний коэффициент фильтрации $k$ для всей области водопонижения, среднюю мощность водоносного горизонта $M$, принимая соответствующие значения дебитов проектируемых взаимодействующих скважин, а также радиус депрессии $R$. В нашем случае, наоборот, известны понижения в наблюдательных скважинах и расходы водопонижающих скважин, а требуется установить значения $k$ и $R$.

Исходя из этого, используем уравнение Форхгеймера в следующем виде, учитывая при этом неоднородность фильтрационных свойств отдельных участков области водопонижения:

$$S_i = S'_1 + S'_2 + \ldots + S'_n = \frac{Q_1 \lg \frac{R}{\rho_1}}{2{,}73 k_1 M_1} + \frac{Q_2 \lg \frac{R}{\rho_2}}{2{,}73 k_2 M_2} + \ldots + \frac{Q_n \lg \frac{R}{\rho_n}}{2{,}73 k_n M_n}, \quad (1)$$

где $S_i$ — общее понижение (от первоначального пьезометрического уровня до начала водопонизительных работ) в некоторой $i$-той точке депрессионной поверхности, причем $S_i = Z_{i\text{ест}} - Z_i$, т. е. $S_i$ — разность отметок первоначального и сниженного уровней в данной точке, *м*;

$S'_1, S'_2, \ldots, S'_n$ — местные понижения от действия отдельных водопонижающих скважин, *м*;

$Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ — дебиты водопонижающих скважин, $м^3/ч$;

$k_1M_1, k_2M_2, \ldots, k_nM_n$ — соответственно коэффициенты фильтрации и мощности водоносного горизонта на участках расположения водопонижающих скважин, $м^3/ч$;

$\rho_1, \rho_2, \ldots \rho_n$ — расстояния от $i$-той точки до соответствующих водопонижающих скважин, *м*;

$R$ — общий радиус депрессионной воронки (приведенный радиус питания), *м*.

Преобразуем уравнение (1) следующим образом:

$$Z_i = Z_{i\text{ест}} - \left(\frac{Q_1 \lg R}{2{,}73 k_1 M_1} + \frac{Q_2 \lg R}{2{,}73 k_2 M_2} + \ldots + \frac{Q_n \lg R}{2{,}73 k_n M_n}\right) + \frac{Q_1}{2{,}73 k_1 M_1} \lg \rho_1 + \frac{Q_2}{2{,}73 k_2 M_2} \lg \rho_2 + \ldots + \frac{Q_n}{2{,}73 k_n M_n} \lg \rho_n. \quad (2)$$

Для различных точек в этом уравнении переменными величинами будут только $Z_{i\text{ест}}$ и $\lg \rho_1$, $\lg \rho_2$, ..., $\lg \rho_n$, а постоянными — все остальные. Для них введем буквенные обозначения:

$$N_1 = \frac{Q_1}{2{,}73 k_1 M_1}; \quad N_2 = \frac{Q_2}{2{,}73 k_2 M_2}; \quad \ldots; \quad N_n = \frac{Q_n}{2{,}73 k_n M_n};$$

$$B = \lg R (N_1 + N_2 + \ldots + N_n).$$

Подставив эти обозначения в уравнение (2), получим

$$Z_i = Z_{i\text{ест}} - B + N_1 \lg \rho_1 + N_2 \lg \rho_2 + \ldots + N_n \lg \rho_n. \quad (3)$$

Имея систему из $n$ уравнений (для различных наблюдательных скважин) и решив ее, можно найти $B$, $N_1$, $N_2$, ..., $N_n$, а затем определить $k_1M_1$, $k_2M_2$, ..., $R$.

В нашем случае следовало бы составить 18 уравнений (по числу наблюдательных скважин, где известны $Z_i$), но можно ограничиться 11, так как некоторые наблюдательные скважины, особенно на шахте 5, расположены близко к действующим водопонижающим скважинам, и на величине $Z_i$ сказывается влияние гидродинамического несовершенства водопонижающих скважин. Кроме того, целесообразно объединить компактно расположенные водопонижающие скважины в группы, чтобы облегчить последующие расчеты. Для построения гидроизопьез вдали от таких групп это упрощение вполне допустимо. В общую группу

можно было объединить, например, водопонижающие скважины 11, 21, 22, 33 и 34 (поле шахты 5) с суммарным дебитом 390 $м^3/ч$, скважины 23 и 25 (поле шахты 6) с $\Sigma Q = 345$ $м^3/ч$ и скважины 15 и 16 (поле шахты 7) с $\Sigma Q = 355$ $м^3/ч$.

Буквенные обозначения для постоянных величин в уравнении (3) даны в последовательности, приведенной в табл. 2.

Таблица 2

| $N_i$ | Поле шахты | № скважины | Средняя мощность вскрытых доломитов $M_в$, $м$ | $Q_i$, $м^3/ч$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 7 | 15 и 16 | 33,8 | 355 |
| 2 | 7 | 14 | 26,5 | 75 |
| 3 | 6 | 23 и 25 | 20,2 | 345 |
| 4 | 4 | 248 и 231 | 18,3 | 260 |
| 5 | 5 | 28 | 52,3 | 100 |
| 6 | 5 | 11 ÷ 34 | 29,6 | 390 |
| 7 | Водозабор г. Сафоново | | ~30 | 200 |
| 8 | 8 | 9 | 16,8 | 170 |
| 9 | 2 | 343 | 16,5 | 185 |
| | | | Итого | 2080 |

Отметки естественного уровня в наблюдательных скважинах взяты с плана гидроизопьез 1949 г. Расстояния от каждой наблюдательной скважины измерены до соответствующих водопонижающих или до «центра тяжести» группы водопонижающих скважин, а затем определены логарифмы этих расстояний ($\lg \rho_1$; $\lg \rho_2$; ...; $\lg \rho_n$). Полученные данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

| № скважины | $\frac{Z_{iест}}{Z_i}$ | $S_i$ | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ | $N_4$ | $N_5$ | $N_6$ | $N_7$ | $N_8$ | $N_9$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 161,0<br>120,7 | 40,3 | 500<br>2,70 | 840<br>2,92 | 2100<br>3,32 | 3640<br>3,55 | 5460<br>3,74 | 5810<br>3,76 | 6300<br>3,80 | 3600<br>3,56 | 4350<br>3,64 |
| 17 | 159,3<br>118,4 | 40,9 | 570<br>2,75 | 900<br>2,95 | 1500<br>3,18 | 3380<br>3,54 | 5150<br>3,71 | 5550<br>3,74 | 6180<br>3,79 | 3870<br>3,59 | 4450<br>3,65 |
| 20 | 163,3<br>129,8 | 33,2 | 1120<br>3,05 | 1120<br>3,05 | 2590<br>3,41 | 3790<br>3,58 | 5530<br>3,74 | 5800<br>3,76 | 6050<br>3,78 | 2890<br>3,46 | 3900<br>3,59 |
| 12 | 157,5<br>113,7 | 43,8 | 1910<br>3,28 | 1800<br>3,25 | 350<br>2,54 | 1850<br>3,27 | 3500<br>3,54 | 3940<br>3,59 | 4860<br>3,69 | 3800<br>3,58 | 3740<br>3,57 |
| 18 | 154,2<br>96,0 | 58,2 | 5060<br>3,70 | 4730<br>3,67 | 4030<br>3,60 | 1950<br>3,29 | 600<br>2,78 | 360<br>2,55 | 1380<br>3,14 | 3850<br>3,58 | 2550<br>3,40 |
| 29 | 159,8<br>113,5 | 46,3 | 2250<br>3,35 | 1890<br>3,28 | 1660<br>3,22 | 1150<br>3,06 | 2840<br>3,45 | 3140<br>3,49 | 3600<br>3,56 | 2250<br>3,35 | 2090<br>3,32 |
| 30 | 160,6<br>120,3 | 40,3 | 2130<br>3,33 | 1750<br>3,24 | 1920<br>3,28 | 1620<br>3,21 | 3220<br>3,51 | 3460<br>3,54 | 3750<br>3,57 | 1800<br>3,25 | 1910<br>3,28 |
| 348 | 160,0<br>112,4 | 47,6 | 4820<br>3,68 | 4440<br>3,64 | 4220<br>3,62 | 2460<br>3,39 | 2280<br>3,35 | 2080<br>3,31 | 1260<br>3,10 | 2520<br>3,40 | 1110<br>3,05 |
| 10 | 160,8<br>123,1 | 37,7 | 3670<br>3,56 | 3330<br>3,52 | 3950<br>3,59 | 3350<br>3,52 | 4320<br>3,63 | 4330<br>3,63 | 3760<br>3,57 | 310<br>2,49 | 1440<br>3,15 |
| 22 | 160,8<br>122,4 | 38,4 | 3460<br>3,54 | 3120<br>3,49 | 3760<br>3,57 | 3200<br>3,50 | 4240<br>3,62 | 4280<br>3,63 | 3780<br>3,58 | 150<br>2,17 | 1430<br>3,15 |
| 23 | 161,0<br>123,4 | 37,6 | 2880<br>3,46 | 2530<br>3,41 | 3180<br>3,50 | 2780<br>3,44 | 4020<br>3,60 | 4120<br>3,61 | 3850<br>3,58 | 450<br>2,65 | 1510<br>3,18 |

Примечание. Верхние строки таблицы (для $N_i$ по каждой скважине) — расстояния $\rho$, $м$; нижние — логарифмы этих величин $\lg \rho$.

Используя уравнение (3), попытаемся найти численные значения $B$, $N_1$, $N_2$, ..., $N_9$. Чтобы уменьшить влияние случайных ошибок на искомые величины, нами обработаны фактические наблюдения по методу наименьших квадратов[1]. Результаты обработки по этому методу сведены в табл. 4, представляющие собой 10 линейных (так называемых нормальных) уравнений с 10 неизвестными. По приближенному решению этих уравнений:

$B = 197$ м; $N_1 = 4{,}4$ м; $N_2 = 1{,}2$ м; $N_3 = 8{,}1$ м; $N_4 = 5{,}6$ м;
$N_5 = 4{,}7$ м; $N_6 = 13$ м; $N_7 = 2{,}7$ м; $N_8 = 2{,}5$ м; $N_9 = 3{,}3$ м.

Таблица 4

| № уравнения | $B$ | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ | $N_4$ | $N_5$ | $N_6$ | $N_7$ | $N_8$ | $N_9$ | $\frac{\sum n_i S_i}{\sum n_i' S_i'}$ | $\varepsilon_i$ | Относительная ошибка, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 1 | 11,0<br>2167 | —36,4<br>—160 | —36,4<br>—44 | —36,8<br>—298 | —37,2<br>—208 | —39,1<br>—184 | —38,6<br>—502 | —39,2<br>—106 | —35,1<br>—87 | —37,0<br>—122 | 464<br>456 | —8 | 1,72 |
| 2 | —36,4<br>—7170 | 121,7<br>535 | 121,7<br>146 | 123,0<br>995 | 123,7<br>692 | 127,2<br>599 | 127,0<br>1650 | 129,7<br>350 | 121,9<br>304 | 121,6<br>401 | —1511<br>—1498 | + 13 | 0,86 |
| 3 | —36,4<br>—7174 | 121,7<br>535 | 121,3<br>146 | 122,3<br>991 | 123,5<br>692 | 127,5<br>600 | 127,2<br>1655 | 129,0<br>348 | 119,0<br>298 | 122,0<br>403 | —1536<br>—1506 | + 30 | 1,95 |
| 4 | —36,8<br>—7260 | 123<br>541 | 122,3<br>147 | 124,2<br>1008 | 124,2<br>696 | 128,3<br>603 | 128,9<br>1673 | 130,7<br>353 | 123,8<br>309 | 123,4<br>407 | —1520<br>—1523 | —3 | 0,20 |
| 5 | —37,2<br>—7338 | 123,7<br>544 | 123,5<br>148 | 124,2<br>1006 | 127,3<br>713 | 131,5<br>618 | 131,4<br>1713 | 133,1<br>360 | 124,6<br>311 | 125,8<br>416 | —1539<br>—1510 | + 29 | 1,95 |
| 6 | —38,7<br>—7618 | 127,2<br>560 | 127,5<br>153 | 128,3<br>1040 | 131,5<br>736 | 136,7<br>642 | 136,6<br>1773 | 138,2<br>373 | 126,6<br>316 | 130,1<br>430 | —1590<br>—1595 | —5 | 0,31 |
| 7 | —38,6<br>7606 | 127,0<br>559 | 127,2<br>153 | 128,9<br>1048 | 131,4<br>735 | 136,6<br>642 | 136,7<br>1786 | 138,1<br>373 | 122,7<br>307 | 129,9<br>429 | —1585<br>—1574 | + 11 | 0,69 |
| 8 | —39,2<br>—7715 | 129,7<br>570 | 129,0<br>155 | 130,7<br>1058 | 133,1<br>746 | 138,2<br>650 | 138,1<br>1797 | 139,9<br>378 | 124,9<br>312 | 131,9<br>436 | —1611<br>—1613 | —2 | 0,12 |
| 9 | —36,1<br>—7108 | 121,9<br>536 | 119,0<br>143 | 123,8<br>994 | 124,6<br>698 | 126,6<br>595 | 122,7<br>1592 | 134,9<br>337 | 114,4<br>286 | 118,5<br>391 | —1560<br>—1536 | + 24 | 1,54 |
| 10 | —37,0<br>—7285 | 121,6<br>534 | 122,0<br>146 | 123,4<br>992 | 125,8<br>704 | 130,1<br>612 | 129,9<br>1690 | 131,9<br>356 | 118,5<br>296 | 124,8<br>412 | —1526<br>—1543 | —17 | 1,11 |

Примечание. В верхних строках таблицы для каждого уравнения приведены коэффициенты при $B$, $N_1$, $N_2$, ..., $N_9$, а в нижних строках даны численные значения членов уравнений при подстановке в них найденных величин $B$, $N_1$, $N_2$, ..., $N_9$; $\varepsilon_i$ — разница между величинами нижней и верхней строк в графе 12.

В графе 12 сопоставлены правые части уравнений. Как видно из графы 13, разница между ними $\varepsilon_i$ находится в пределах допустимых величин. Относительная ошибка (см. графу 14) варьирует от 0,1 до 2% и в среднем составляет около 1%. Поэтому полученными значениями $B$, $N_1$, $N_2$, ..., $N_9$ вполне можно воспользоваться для дальнейших расчетов. Подставляя эти значения в уравнение (3), получим

$$Z_i = Z_{i\text{ест}} - 197 + 4{,}4 \lg \rho_1 + 1{,}2 \lg \rho_2 + 8{,}1 \lg \rho_3 +$$
$$+ 5{,}6 \lg \rho_4 + 4{,}7 \lg \rho_5 + 13 \lg \rho_6 + 2{,}7 \lg \rho_7 + 2{,}5 \lg \rho_8 + 3{,}3 \lg \rho_9.$$

По этому уравнению рассчитана величина $Z_i$ в наблюдательных скважинах и сопоставлена с отметками, полученными при фактических замерах пьезометрического уровня (табл. 5).

[1] См., например, И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев. Справочник по математике. ОГИЗ, Гостехиздат, 1948, стр. 513—514.

Таблица 5

| Члены уравнения (4) | Значения членов уравнения (4) для соответствующих гидронаблюдательных скважин | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 14 | 17 | 20 | 12 | 18 | 29 | 30 | 348 | 10 | 22 | 23 |
| $Z_{i_{\text{ест}}} - B$ | — 36,0 | —37,7 | — 34,0 | — 39,5 | — 42,8 | — 37,2 | — 36,4 | — 37,0 | — 36,2 | — 36,2 | — 36,0 |
| $N_i \lg \rho_i$: 4,4 lg $\rho_1$ | 11,9 | 12,1 | 13,4 | 14,4 | 16,3 | 14,7 | 14,7 | 16,2 | 15,7 | 15,6 | 15,2 |
| 1,2 lg $\rho_2$ | 3,5 | 3,5 | 3,7 | 3,9 | 4,4 | 3,9 | 3,9 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,1 |
| 8,1 lg $\rho_3$ | 26,9 | 25,8 | 27,6 | 20,6 | 29,2 | 26,1 | 26,6 | 29,3 | 29,1 | 28,9 | 28,3 |
| 5,6 lg $\rho_4$ | 19,8 | 19,8 | 20,0 | 18,3 | 18,4 | 17,1 | 18,0 | 19,0 | 19,7 | 19,6 | 19,3 |
| 4,7 lg $\rho_5$ | 17,6 | 17,4 | 17,6 | 16,6 | 13,0 | 16,2 | 16,5 | 15,7 | 17,1 | 17,0 | 16,9 |
| 13,0 lg $\rho_6$ | 48,8 | 48,6 | 48,9 | 46,7 | 33,2 | 45,3 | 46,0 | 43,0 | 47,2 | 47,2 | 47,0 |
| 2,7 lg $\rho_7$ | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,0 | 8,5 | 9,6 | 9,7 | 8,3 | 9,6 | 9,7 | 9,7 |
| 2,5 lg $\rho_8$ | 8,9 | 9,0 | 8,6 | 8,9 | 8,9 | 8,4 | 8,1 | 8,5 | 6,2 | 5,4 | 6,7 |
| 3,3 lg $\rho_9$ | 12,0 | 12,4 | 11,8 | 11,8 | 11,2 | 11,0 | 10,8 | 10,0 | 10,1 | 10,4 | 10,5 |
| $Z_{i_{\text{расч}}}$ | 123,6 | 121,0 | 127,8 | 111,7 | 100,3 | 115,1 | 117,9 | 117,3 | 123,1 | 121,8 | 121,7 |
| $Z_{i_{\text{факт}}}$ | 120,7 | 118,4 | 129,8 | 113,7 | 96,0 | 113,5 | 120,3 | 112,4 | 123,1 | 122,4 | 123,4 |
| $\Delta = Z_i - Z_{i_{\text{расч}}}$ | —2,9 | —2,6 | + 2,0 | + 2,0 | —4,3 | —1,6 | + 2,4 | —4,9 | 0,0 | + 0,6 | + 1,7 |
| $S$, м | 40,3 | 40,9 | 33,2 | 43,8 | 58,2 | 46,3 | 40,3 | 47,6 | 37,7 | 38,4 | 37,6 |
| $\Delta$, % к $S$ | 7,2 | 6,4 | 6,0 | 4,5 | 7,1 | 3,5 | 6,0 | 10,3 | 0,0 | 1,5 | 4,5 |

Как видно из данных этой таблицы, отклонения от фактических замеров составляют от —4,9 до +2,4 *м*. Среднее из 11 подсчетов — 0,7 *м*. Относительная ошибка (процент к общему понижению в соответствующей наблюдательной скважине) варьирует от 0 до 10,3% и в среднем составляет 5,3%. Это вполне допустимо для практических целей и указывает на полную применимость рассмотренного метода расчета. Наибольшее отклонение $Z_{\text{расч}}$ от $Z_{\text{факт}}$ отмечено в скважине 348, так как в момент замера на шахте 1 была, по-видимому, включена артезианская скважина, которая и дала дополнительное снижение уровня, не учитываемое расчетом.

Анализ данных табл. 5 показывает, что наибольшее влияние на снижение уровней в наблюдательных скважинах оказывают водопонижающие скважины на шахте 5 ($N_6=13$ *м*), затем на шахте 6 ($N_3=8{,}1$ *м*) и на шахте 4 ($N_4=5{,}6$ *м*). Относительно слабое влияние (7—8 октября 1959 г.) было со скважины 14 вп (водопонижающей на шахте 7) и скважины 9 вп на шахте 8 ($N_2=1{,}2$ *м* и $N_8=2{,}5$ *м*).

Теперь можно по той же формуле (4) рассчитать отметки пьезометрических уровней в любых других точках, необходимых для построения общей депрессионной поверхности. Всего получено более 20 дополнительных значений $Z_i$ в соответствующих пунктах месторождения. Для облегчения расчета использованы вспомогательные графики, по координатным осям которых отложены значения $\rho$ (в масштабе 1 : 10 000) и $N_i \lg \rho_i$ (семейство кривых для разных $N_i$). Такие графики дают возможность определять $Z_i$ для одной искомой точки в течение 5 *мин*.

С использованием расчетных точек и данных по всем наблюдательным скважинам на рис. 2 достаточно обоснованно построен план гидроизопьез по состоянию на 7—8 октября 1959 г. для всего месторождения. Полученная депрессионная поверхность имеет асимметричное строение с воронкообразными углублениями на участках действовавших в этот период отдельных групп водопонижающих скважин и городского водозабора.

Наибольшей глубины депрессионная поверхность достигает у водопонизительной установки на поле шахты 5, где, как уже сказано, отмечено мульдообразное понижение в доломитах и, по-видимому, некоторое уменьшение их водопроницаемости в связи с более глинистым составом. Так как и угольный пласт залегает здесь глубже, чем на других шахтах, то и водопонижение следовало осуществлять на бóльшую глубину. Величина понижения в центральной части этой локальной депрессионной воронки больше 70—75 *м* (считая от первоначального уровня 1949 г.).

Следует обратить внимание на то, что гидроизопьезы с отметками 105—135 *м* пересекают долину р. Вопец, уровни воды в которой на этом участке имеют отметки от 128 до 140. Следовательно, пьезометрический уровень в доломитовом горизонте снизился на 20—23 *м* ниже уреза воды в реке, в то время как до водопонижения (при естественной пьезометрической поверхности 1949 г.) отметки в этом горизонте были на 21—26 *м* выше уровня воды реки [1]. Возможно, что при создавшихся условиях здесь происходит уже не разгрузка данного горизонта, а, наоборот, частичное питание доломитов за счет вод четвертичных отложений и инфильтрации речных вод. Насколько существенен этот источник питания, судить трудно, но, вероятно, его роль незначительна, так

[1] В связи с этим в 1951 г. В. А. Котлуков и А. С. Верховский предложили снизить пьезометрические уровни самоизливающимися скважинами, задаваемыми вдоль берега реки.

как основное питание осуществляется из обширной водораздельной области к северо-западу от Сафоново.

План гидроизопьез (см. рис. 2) дает возможность наглядно представить эффективность производимого водопонижения в соответствующий этап осушения и сопоставить достигнутые понижения напора с до-

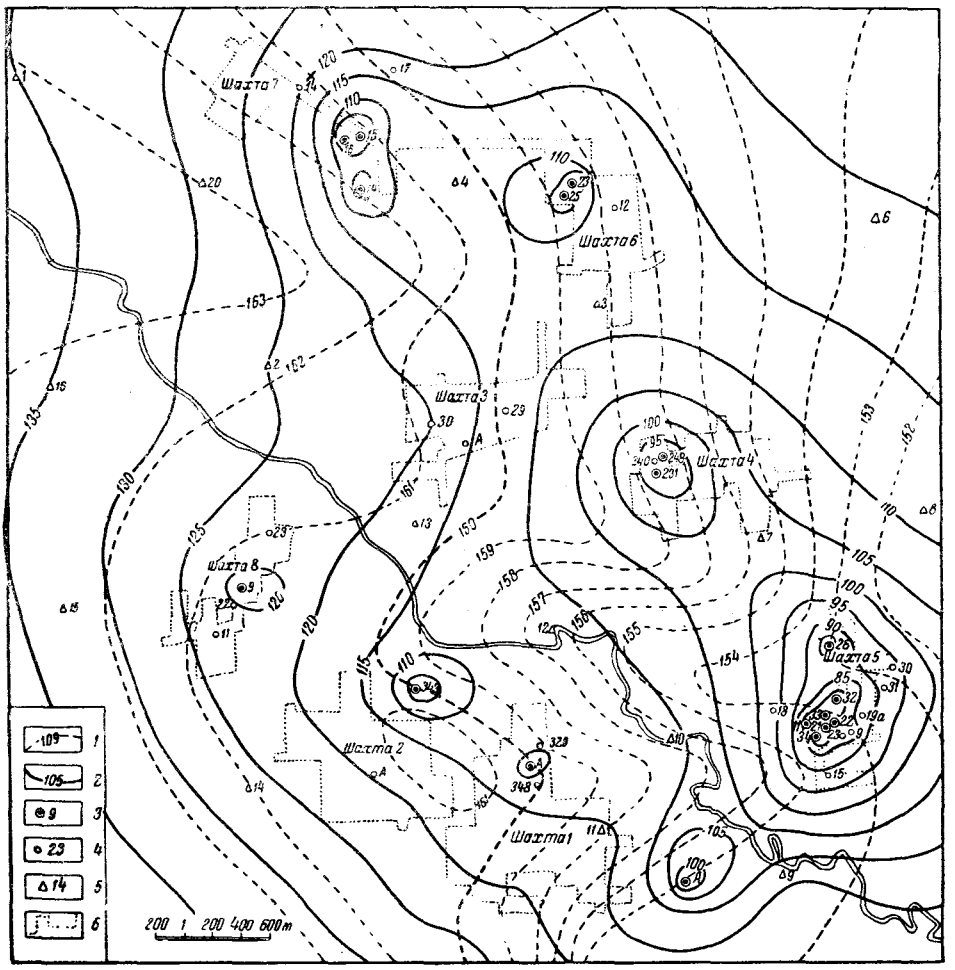



Рис. 2. План гидроизопьез доломитового водоносного горизонта на Сафоновском месторождении в октябре 1959 г.:

*1* — гидроизопьезы до начала шахтного строительства (25 декабря 1949 г.), проведенные через 1 *м*; *2* — гидроизопьезы на 7—8 октября 1959 г. (при работе водопонизительной установки с суммарным дебитом 2080 *м*³/*ч*), проведенные через 5 *м*; *3* — водопонижающие (вп) и артезианские (А) скважины, действовавшие 7—8 октября 1959 г.; *4* — наблюдательные и недействовавшие водопонижающие скважины; *5* — точки, где пьезометрический уровень определен расчетным методом; *6* — контуры шахтных полей.

пустимыми величинами на участках горнопроходческих и очистных работ. Судя по плану гидроизопьез, влияние групповой систематической откачки воды из доломитов распространилось на значительное расстояние, измеряемое уже десятками километров, особенно когда суммарный дебит всех водопонижающих и артезианских скважин достигал 3000 *м*³/*ч* и более. Это подтверждается данными эпизодических замеров уровней воды в отдаленных поисковых, разведочных и артезианских скважинах, пробуренных уже после начала водопонижения на

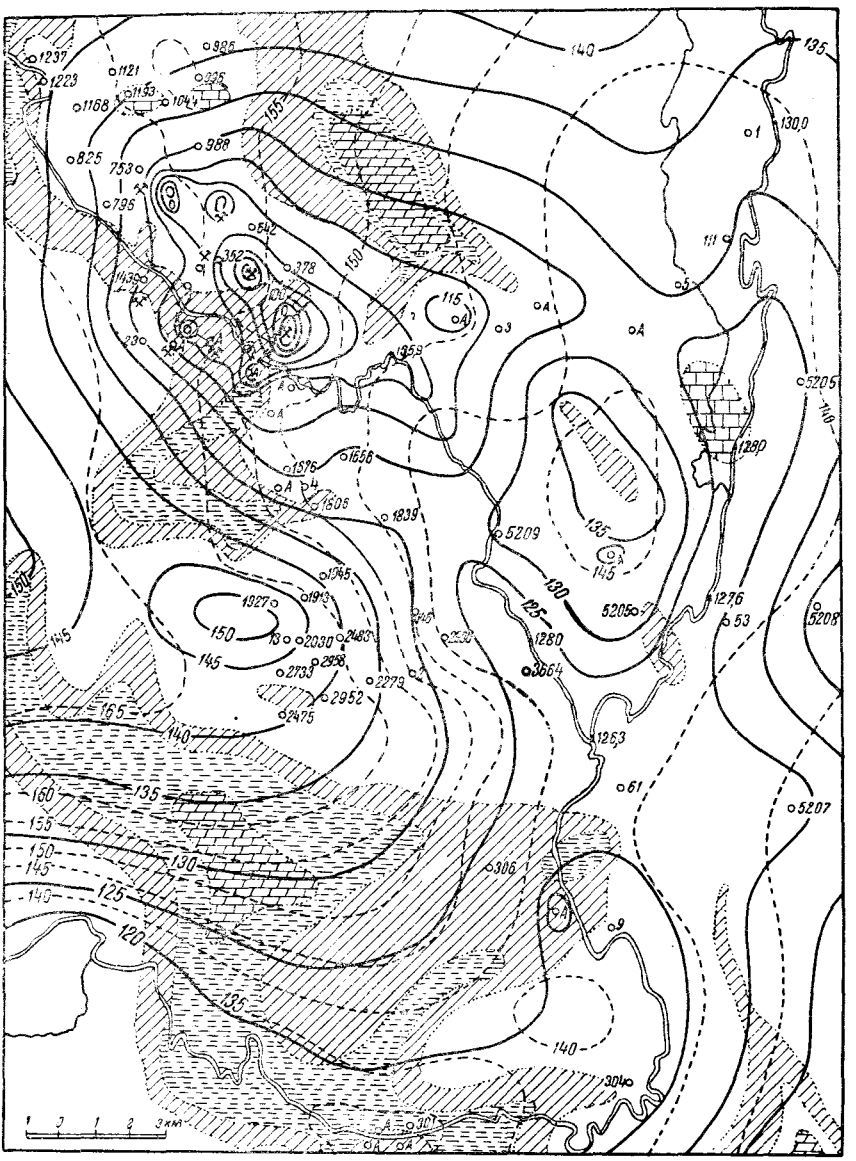



Рис. 3. Схематическая гидрогеологическая карта Дорогобужского угленосного района:
*1* — трещинно-пластовые воды в известняках и поровые воды в песках алексинского горизонта ($G_1v$ *al*); *2* — порово-пластовые воды в песках тульского горизонта ($G_1vt$ *l*); *3* — поровые воды в песчаных отложениях сталиногорского горизонта ($G_1v$ *stl*) линзообразного залегания; *4* — преимущественно водоупорные глинистые породы лихвинского подъяруса ($D_3fm_2$ *dn — lb*) с линзами и прослоями обводненных песков, известняков и мергелей; *5* — пластово-трещинные и карстовые воды в кавернозных доломитах и доломитизированных известняках верхов данково-лебедянского подъяруса ($D_3fm_2$ *dn — lb*) — доломитовый водоносный горизонт; *6* — гидроизопьезы в доломитовом водоносном горизонте до начала шахтного строительства; *7* — гидроизопьезы в том же горизонте на октябрь 1959 г.; *8* — разведочные скважины, по которым имелись замеры уровней воды; *9* — артезианские скважины (водопонижающие скважины в данном масштабе не показаны); *10* — шахты, на территории которых есть водопонизительные установки; *11* — относительные отметки уровней воды в поверхностных водотоках (в обозначениях *1—5* в пределах контуров распространения вод более молодых отложений находятся и нижележащие водоносные горизонты в более древних отложениях). Воды рыхлых пород четвертичного возраста распространены повсеместно и на карте не показаны.

Сафоновском месторождении. Поскольку эти данные не единовременны, построенная на их основании карта гидроизопьез (рис. 3) весьма приближенна. Тем не менее она дает общее представление об изменении естественного режима подземных вод под влиянием мощной водопонизительной установки. Так, например, по данным Смоленской комплексной экспедиции Геологического управления центральных районов МГиОН, в поисковых скважинах 5205 и 5207 зафиксированы уровни в доломитах на относительных отметках 129 и 124,5. Первая скважина расположена на расстоянии 14,7 *км* к востоку от центра депрессионной воронки, а вторая — на 20 *км* к юго-востоку. Обе находятся на левом берегу Днепра. Уровни воды в реке на этом участке имели отметки от 126,5 до 128,6. Следовательно, в какие-то периоды работы водопонизительной установки влияние ее распространялось уже за пределы зоны естественной разгрузки. Следует подчеркнуть, что пьезометрический уровень в доломитах на какой-то отрезок времени «отрывался» от горизонта воды в реке, так как радиус депрессии превышал 20 *км*.

Рассчитаем значения коэффициентов фильтрации на отдельных участках области водопонижения и найдем общий радиус депрессии на 7—8 октября 1959 г.

Исходя из уравнения (2) и полученных величин $N_1$, $N_2$, ..., $N_9$, сначала определим показатель водообильности $k_iM_i$ [4]. Так, например, для участка скважин 15 и 16 (шахты 7), где $N_1=4{,}4$ *м*, получим

$$k_iM_i=\frac{Q}{2{,}73N_1}=\frac{355}{2{,}73\cdot 4{,}4}=29{,}5\ м^2/ч.$$

Если коэффициент фильтрации отнести только к вскрытой мощности водоносного горизонта $M_в$ (см. табл. 2), то

$$k_1=\frac{Q_1}{2{,}73M_вN_1}=\frac{29{,}5}{33{,}8}=0{,}87\ м/ч,\ \text{или}\ 20{,}9\ м/сутки.$$

Если же учитывать активную зону при откачке, принимая ее приближенно равной $\frac{4}{3}M_в$, в данном случае 45 *м*, то получим $k=0{,}65$ *м/ч*, или 16,7 *м/сутки*. Наконец, если отнести коэффициент фильтрации к полной мощности водоносного горизонта, т. е. к 70 *м*, то получим $k$, равное 0,42 *м/ч*, или 10,1 *м/сутки*.

Аналогично рассчитанные для всех остальных участков значения $k$ сведены в табл. 6. Там же приведены коэффициенты фильтрации по данным опробования одиночных гидрогеологических скважин (во время разведки месторождения), тяготеющих по расположению к соответствующим участкам водопонижения.

Анализ данных табл. 6 позволяет сделать следующие замечания и рекомендации:

1. Водопроницаемость участков месторождения различна. Максимальное значение коэффициента фильтрации почти в 10 раз больше минимального. Следовательно, при расчете водопонижения нельзя пользоваться усредненным значением $k$ для всего месторождения.

2. При определении по данным откачки из несовершенных скважин следует указывать как полную мощность (если она известна), так и принятую в расчете, иначе коэффициенты фильтрации по разным скважинам, участкам и шахтным полям несопоставимы.

3. Наиболее вероятным следует считать значение $k$, полученное с учетом активной зоны. При расчете $k$ по формуле Дюпюи с учетом только вскрытой части доломитов результаты будут завышены, а при подстановке в нее полной мощности — занижены. Для одиночных скважин правильнее пользоваться соответствующими формулами для несовер-

шенных скважин: например, формулой Гиринского, результаты подсчета по которой приведены в табл. 6. Но для водопонижающих скважин, а тем более их групп, это невозможно, так как динамический уровень по ряду причин в таких скважинах не замеряется и, следовательно, остается неизвестной величина понижения уровня в самой скважине, без которой пользоваться этими формулами нельзя.

Таблица 6

| Поле шахты | При водопонижении (X. 1959 г.) | | | | | При разведке (1947—1951 гг.) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_i$ | номер водопонижающей скважины | $k$ с учетом вскрытой мощности | $k$ с учетом активной зоны | $k$ с учетом полной мощности | номер гидрогеологической и артезианской скважин | $k$ с учетом вскрытой мощности | $k$ с учетом активной зоны | $k$ с учетом полной мощности | $k$ по формуле Гиринского |
| 7 | 4,4 | 15 и 16 | 20,9 | 15,7 | 10,1 | 753 | 10,3 | 7,6 | 1,4 | 6,8 |
| | | | | | | 796 | 39,0 | 28,3 | 5,6 | 26,5 |
| 7 | 1,2 | 14 | 20,6 | 15,5 | 7,8 | 825 | 0,7 | 0,7 | 0,1 | 0,5 |
| | | | | | | 988 | 6,7 | 5,0 | 1,0 | 4,5 |
| 6 | 8,1 | 23 и 25 | 18,5 | 13,9 | 5,4 | 648 | 1,1 | 0,8 | 0,1 | 0,7 |
| | | | | | | 2 (гидроузел) | 8,7 | 6,5 | 1,2 | 5,8 |
| | | | | | | 714 | 10,3 | 7,6 | 2,3 | 7,1 |
| 4 | 5,6 | 231 и 248 | 22,4 | 16,8 | 5,8 | 373 | 11,0 | 8,3 | 1,0 | 6,5 |
| | | | | | | 2-А | 4,8 | 3,6 | 1,0 | 2,9 |
| | | | | | | 4-А | 25 | 18,7 | 2,1 | 13,0 |
| 5 | 4,7 | 28 | 3,6 | 2,7 | 2,7 | 310 | 21,0 | 15,7 | 3,0 | 12,4 |
| | | | | | | 297 | 17,8 | 13,3 | 1,4 | 9,6 |
| | | | | | | 307 | 14,0 | 10,5 | 2,0 | 7,5 |
| | 13,0 | 11, 21, 22, 32, 34 и 35 | 8,8 | 6,6 | 3,8 | 5-А | 14,4 | 10,8 | 3,1 | 8,4 |
| | | | | | | 207 | 7,0 | 5,3 | 0,6 | 4,1 |
| | | | | | | 290 | 5,3 | 4,0 | 0,5 | 3,1 |
| г. Сафоново | 2,7 | Скважина водозабора | 21,7 | 16,3 | 9,3 | 16 | 11,0 | 8,3 | 3,8 | 7,5 |
| | | | | | | 1-А | 25,0 | 18,7 | 4,2 | 13,8 |
| 8 | 2,5 | 9 | 35,4 | 26,6 | 8,5 | 1439 | 6,5 | 4,9 | 0,9 | 4,4 |
| 2 | 3,3 | 343 | 30,0 | 22,4 | 7,0 | 23 | 4,5 | 3,4 | 0,6 | 2,5 |
| | | | | | | 1-А | 33,0 | 24,7 | 5,9 | 18,5 |
| Среднеарифметическое | | | 20,2 | 15,2 | 6,7 | | 13,2 | 9,8 | 2,0 | 7,8 |

4. Данные о водопроницаемости доломитов, полученные во время разведки месторождения, близки к расчетным, но характеризуются меньшими величинами $k$. Среднеарифметическое значение $k$, по данным разведки, составляет только 65% от средней величины $k$, полученной по результатам водопонижения на тех же участках месторождения.

5. Средняя величина $k$, равная 20,3 *м/сутки*, подтверждает положение о том, что при проектировании водопонизительных работ расчетное

значение $k$ следует брать не как среднеарифметическое из данных по всем откачкам, а только по тем из них, которые дали более надежные результаты. Такие результаты получаются, когда скважины вскрывают наиболее трещиноватые или кавернозные зоны, более длительно и интенсивно производится откачка и отсутствует искусственная глинизация вскрытой части доломитов. О необходимости опытных откачек с возможно бо́льшими расходами и понижениями имеются указания у целого ряда специалистов, изучавших и работавших в Подмосковном бассейне, в частности А. И. Антоненко [1].

Перейдем к определению радиуса депрессии $R$. Из выражения для $B$ следует, что

$$\lg R = \frac{B}{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9}.$$

Подставляя в эту формулу ранее найденные значения $B$, $N_i$, получим

$$\lg R = \frac{197}{45{,}5} = 4{,}33,$$

откуда $R = 21\,400$ *м* или 21,4 *км*.

Эта величина $R$ хорошо согласуется с приведенными ранее данными по реагировавшим скважинам, расположенным на расстоянии 17—20 *км* от центра водопонижения.

Таким образом, рассмотренную здесь методику расчета и построения депрессионной поверхности и связанную с ней методику определения параметров осушаемого водоносного горизонта целесообразно использовать для решения ряда практических вопросов.

Пример 1. В связи с изменением числа и взаимного расположения действовавших к концу 1960 г. водопонижающих скважин на Сафоновском месторождении была построена новая депрессионная поверхность (рис. 4). Как видно из сопоставления рис. 2 и 4, обе депрессионные воронки довольно существенно отличаются друг от друга, что вызвано в основном отключением скважин, действовавших ранее на шахтах 5 и 8. Введены в действие новые скважины на поле шахты 1. Общий расход уменьшился на 670 $м^3/ч$, вследствие чего пьезометрические уровни поднялись. При построении депрессионной поверхности рассчитаны $Z_i$ более чем в 20 точках, что дало возможность уверенно провести гидроизопьезы на участках разработки 1960 г., где наблюдательных скважин не было. При расчете $Z_i$ в этих точках не понадобилось вновь решать систему нормальных уравнений и производить сложные математические выкладки. Достаточно было методом подбора так видоизменить некоторые значения $N_i$, чтобы при подстановке соответствующих величин в уравнение (3) получалась удовлетворительная сходимость $Z_i$ в нескольких наблюдательных скважинах, по которым имелись фактические отметки пьезометрических уровней. После этого можно было производить расчеты $Z_i$ и для новых точек, задаваемых произвольно на площади месторождения.

Поскольку эта работа выполнялась рядовыми инженерно-техническими работниками шахтной геологической службы треста Смоленскуголь, можно считать, что предложенная методика уже внедрена в практику производственных предприятий.

Пример 2. Для обеспечения безопасной разработки огнеупорных глин на шахте 1 необходимо было установить число дополнительных водопонижающих скважин на шахтном поле. Эти скважины при взаимодействии с другими скважинами остальных шахтных полей должны

были снизить напоры до заданных величин. По той же методике было найдено, что четыре водопонижающие скважины с суммарным расходом порядка 320 $м^3/ч$ снизят пьезометрическую поверхность на защищаемом очистном участке до отметок 97—104 *м*.

Пример 3. По заданию треста Смоленскуголь нами произведен анализ состояния депрессионных поверхностей в осушаемых горизонтах

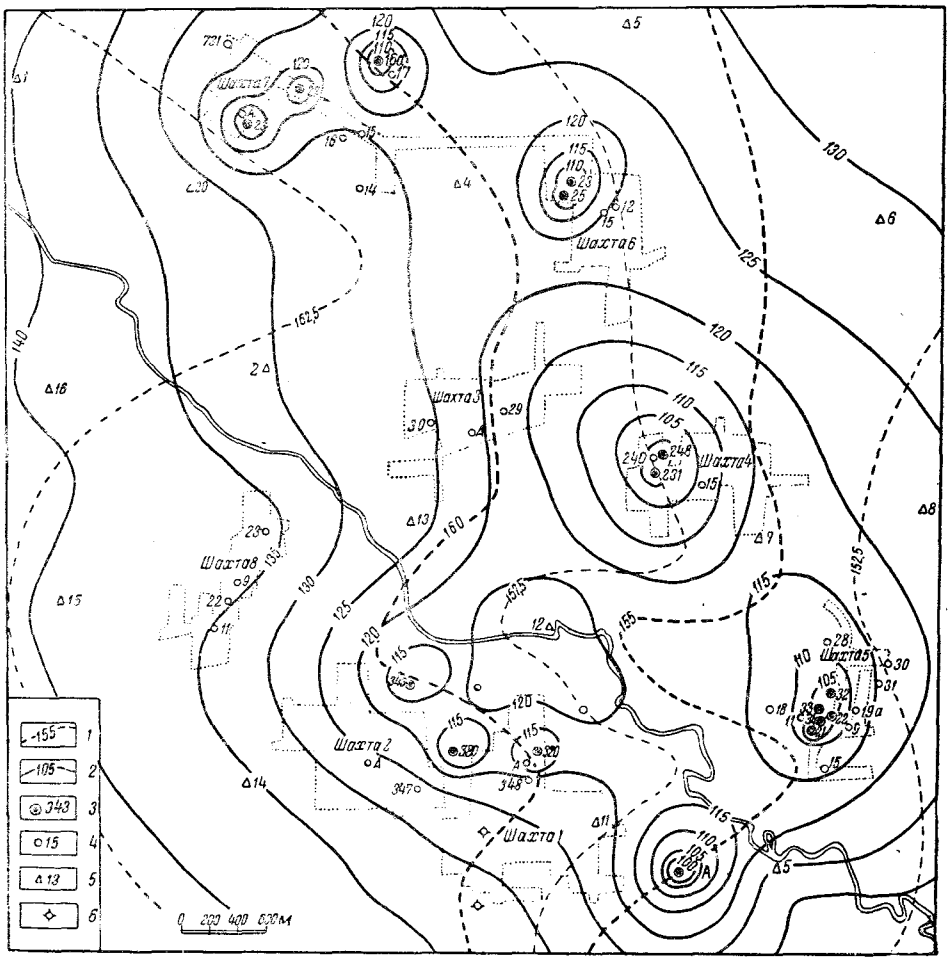



Рис 4. План гидроизопьез доломитового водоносного горизонта на Сафоновском месторождении в октябре 1960 г.:

*1* — гидроизопьезы до начала шахтного строительства, проведенные через 2,5 *м*; *2* — гидроизопьезы 10 октября 1960 г. (при работе водопонизительной установки с суммарным дебитом 1410 $м^3/ч$), проведенные через 5 *м*; *3* — водопонижающие и артезианские скважины, действовавшие 10 октября 1960 г.; *4* — наблюдательные и недействовавшие водопонижающие скважины; *5* — точки, где пьезометрический уровень определен расчетным методом; *6* — проектируемые водопонижающие скважины для дополнительного снижения напора при добыче огнеупорной глины на шахте 1.

для случая, когда некоторые шахты будут поставлены на так называемую «мокрую» консервацию. Здесь также пригодились контрольные расчеты для прогноза увеличения обводненности действующих шахт.

Наконец, следует иметь в виду, что изменения в режиме водопонижения сказываются на условиях водоснабжения, и, наоборот, интенсификация работы артезианских скважин облегчает условия водопонже-

ния на смежных участках. Здесь также может быть использована рассмотренная ранее методика для ориентировочных расчетов взаимодействия эксплуатационных скважин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время нет необходимости изменять в принципе существующую систему осушения. Но для повышения технико-экономической эффективности осушительных работ следует несколько видоизменить эту систему, задавая, например, водопонижающие скважины и сквозные фильтры (в зонах древних размывов) на надугольные водоносные горизонты и подземные разгружающие (самоизливающиеся) скважины—на доломиты. При необходимости больших понижений такие скважины, задаваемые из горных выработок, рекомендуется оборудовать погружными электрическими центробежными насосами, например типа ЭПЛ и ЭПН. Для водопонижающих скважин, буримых с поверхности, эти насосы также имеют несомненное преимущество перед применяемыми сейчас ПМНЛ, АПВ, АТН (по диаметру, простоте монтажа, к. п. д., затрате электроэнергии и другим показателям).

Рекомендуемые мероприятия имеют целью улучшение системы осушения и уменьшение затрат на осушение.

2. Водопонижение в доломитовом водоносном горизонте в условиях Сафоновского и аналогичных ему месторождений следует производить комплексно для всех действующих шахт. При этом снижение пьезометрического уровня на разрабатываемых участках необходимо осуществлять до отметок, соответствующих допустимым (безопасным) напорам, рассчитанным с учетом защитной роли водоупорных глин между подошвой выработок и кровлей напорного горизонта.

3. Проекты комплексного осушения 1956 и 1958 гг. в виду сокращения угледобычи на месторождении в настоящее время во многом уже устарели. Подземный вариант осушения доломитов, рассмотренный в проекте 1956 г., вследствие больших капитальных затрат теперь нецелесообразен. Имеющегося числа водопонижающих скважин (на доломиты) достаточно, чтобы снизить напоры на действующих шахтах до необходимой величины. Есть основание полагать, что при суммарном дебите скважин порядка 3 тыс. $м^3/ч$ происходит постепенное истощение естественных (и в первую очередь упругих) запасов доломитового водоносного горизонта.

При расширении добычи огнеупорных глин ввиду того, что выработки по ним углубляются в водоупорную толщу, потребуется дополнительное число водопонижающих скважин, определяемых расчетом.

4. По результатам анализа материалов водопонижения нами предложен новый метод, позволяющий на основании имеющихся данных по наблюдательным и водопонижающим скважинам выявить общую закономерность формирования сложной депрессионной поверхности, обусловленной неодинаковой водопроницаемостью пород на отдельных участках месторождения при различных дебитах и понижениях довольно значительного числа водопонижающих скважин, расположенных без определенной системы на большой площади.

5. Этим методом можно достаточно точно построить депрессионные поверхности на участках, где нет наблюдательных скважин, и, в частности, на участках, где необходимо сопоставлять фактические напоры с допустимыми с целью предотвращения прорыва воды в горные выработки или в какие-либо другие подземные сооружения, независимо от их назначения.

6. Разработанная методика позволяет определить некоторые «параметры» водоносного горизонта (в сфере влияния водопонизительной

установки), в частности сопоставить величины $k$ и $R$ с принятыми в проектах осушения и полученными в процессе разведки, т. е. при гидрогеологических исследованиях до начала горных работ. Это дает основание к корректировке проектных решений и проводимых осушительных мероприятий.

7. Пользуясь предложенной методикой, работники шахтной геологической службы получают возможность контролировать работу крупной водопонизительной установки, наиболее рационально выбирая (путем расчета) необходимое число действующих водопонижающих скважин в соответствующие этапы развития горных работ.

8. Предложенная методика гидрогеологических расчетов может быть использована не только в условиях Сафоновского месторождения. Так, например, в условиях Ленинградского сланцевого месторождения оказалось возможным построить относительно сложную депрессионную поверхность для напорного водоносного горизонта в песчаных породах $Cm_{2+3}+O_1$ (на территории четырех действующих шахт комбината «Сланцы»).

## ЛИТЕРАТУРА


1. Антоненко А. И. Осушение шахтных полей Подмосковского угольного бассейна. Углетехиздат, 1954.
2. Бабокин И. А. Шахтные воды и способы борьбы с ними в Подмосковном бассейне. Углетехиздат, 1954.
3. Каменский Г. Н., Толстихина М. М., Толстихин Н. И. Гидрогеология СССР. Госгеолтехиздат, 1959.
4. Керкис Е. Е. Об оценке водообильности водоносных горизонтов. Тр. Лаборатории гидрогеол. проблем, 1948, т. III.
5. Ломтадзе В. Д. Физико-механические свойства глин угленосной свиты нижнего карбона Подмосковного бассейна. Зап. ЛГИ, 1952, т. XXVI, вып. 2.
6. Материалы технического совещания по осушению шахтных полей Дорогобужского угольного месторождения Подмосковного бассейна. БТИ Смоленского совнархоза, 1959.
7. Морозов А. П. Прогноз прорывов воды из почвы горных выработок. Зап. ЛГИ, 1952, т. XXVI, вып. 2.
8. Объяснительная записка к геологической карте СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Московская, лист N-36-X, Госгеолтехиздат, 1959.
9. Паукер Н. Г. О расчете коэффициента фильтрации, радиуса влияния и понижения пьезометрического уровня по данным групповой откачки из несовершенных скважин. Зап. ЛГИ, 1955, т. XXXII, вып. 2.
10. Паукер Н. Г. Методика и результаты изучения глинистых пород на разрыв гидравлическим способом. Тр. совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения, т. I. Изд-во АН СССР, 1956.
11. Паукер Н. Г. Некоторые вопросы осушения шахт Сафоновского буроугольного месторождения. Мат-лы технического совещания по осушению шахтных полей Дорогобужского угольного месторождения Подмосковного бассейна. БТИ Смоленского совнархоза, 1959.
12. Справочное руководство гидрогеолога (под ред. В. М. Максимова). Гостоптехиздат, 1959.