

Об особенностях подсчета запасов урана в осадочных породах при подземном выщелачивании

В. П. НОВИК-КАЧАН

УДК 669.882.3

Давно известный беспаштный способ добычи растворимых солей выщелачиванием в последнее время стал предметом пристального внимания. Появились новые области и расширились масштабы его применения. В частности, он стал использоваться для отработки некоторых рудных месторождений, в том числе и урана.

Сущность способа подземного выщелачивания состоит в том, что полезный компонент с помощью раствора извлекается из руды непосредственно на месте ее залегания. Выщелачивающий (рабочий) раствор подводится к рудному телу с помощью скважин. Образующийся продуктивный раствор извлекается на поверхность также через скважины. Горные работы не применяются ни для вскрытия рудного тела, ни для его отработки.

При выщелачивании в пласте область движения выщелачивающего раствора не ограничивается контуром рудного тела. Границами ее по разрезу являются водоупорные и слабо проницаемые горные породы кровли и почвы, а по площади — гидродинамический контур, формирующийся в результате взаимодействия нагнетательных и разгрузочных скважин (рис. 1), или также слабо проницаемые и водоупорные разности горных пород и руд. В случае, когда мощность продуктивного горизонта во много раз превышает мощность рудного тела, движение рабочего раствора может ограничиваться по разрезу гидродинамическими завесами, создаваемыми искусственно. Движение выщелачивающего раствора по всему разрезу продуктивного пласта приводит к тому, что в процесс выщелачивания вовлекается вся рудная минерализация, включая самые низкие содержания. Этим создается потенциальная возможность увеличения количества активных запасов вследствие снижения бортового содер-

жания. В качестве последнего в краевой пробе (по сечению) может быть принято содержание металла, который остается в руде при данном режиме выщелачивания. Иными словами, все то, что переходит в раствор, должно включаться в подсчет запасов.

Назовем область движения рабочего раствора в продуктивном пласте выщелачиваемым объемом V_v . Очевидно, что чем большую долю выщелачиваемого объема составляет рудная часть пласта, тем более благоприятны условия для выщелачивания.

Уран в ходе выщелачивания распространяется вместе с раствором по всему выщелачиваемому объему. Поэтому условно можно считать, что до начала выщелачивания он также был равномерно распределен по этому объему с соответствующей степенью «разубоживания». Степень «разубоживания» определяется отношением средней мощности рудного тела m к средней мощности продуктивного пласта M между водоупорами или гидродинамическими завесами.

Качество запасов по содержанию урана при подземном выщелачивании можно охарактере-

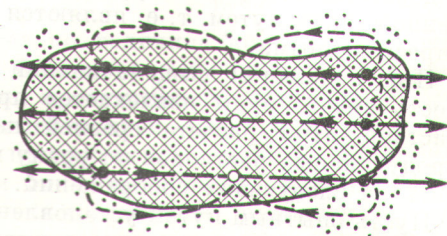


Рис. 1. Соотношение контура рудного тела и гидродинамического контура при подземном выщелачивании:

● — нагнетательные скважины; ○ — разгрузочные скважины; —→— направление движения растворов; — — — гидродинамический контур; ————— контур рудного тела.

ризовать двумя величинами: средним содержанием в единице объема рудного тела V и средним содержанием в единице выщелачиваемого объема. Первую величину назовем удельной объемной продуктивностью рудного тела q_p , а вторую — приведенной удельной объемной продуктивностью выщелачиваемого объема $q_{пр}$. Тогда

$$q_p = \frac{P}{V} \text{ и } q_{пр} = \frac{P}{V_B}, \quad (1)$$

где P — весовое количество урана в рудном теле.

Выщелачиваемый объем равен произведению площади S , ограниченной гидродинамическим контуром, на среднюю мощность продуктивного пласта. Так как

$$P = Smc\gamma_p,$$

то

$$q_{пр} = \frac{mc\gamma_p}{M}, \quad (2)$$

где c — среднее содержание металла в рудоносных породах; γ_p — объемный вес рудоносных пород.

Из формулы (2) видно, что приведенная удельная объемная продуктивность тем выше, чем выше содержание урана в метрограммах или метропроцентах (mc) и чем больше отношение m/M . Величина, обратная этому отношению, показывает степень разбавления продуктивных растворов в результате их распространения в безрудную часть пласта по мощности. Эту величину можно назвать коэффициентом разбавления.

Если в выщелачиваемом объеме имеется несколько рудных тел, расположенных на разных уровнях, рудная площадь определяется как площадь проекции этих тел на параллельную им плоскость. Средняя мощность и среднее содержание относятся к рудной площади, полученной таким путем, т. е. являются величинами спрессованными.

При подземном выщелачивании на поверхность вместо руды извлекается продуктивный раствор. При расчете средней концентрации продуктивных растворов по урану можно исходить из следующих соображений.

Пусть опытным путем установлено, что коэффициент извлечения урана из руды в раствор равен ε , а объем затраченного рабочего раствора $V_{ж}$. Жидкая и твердая фазы находятся при этом в весовом отношении $Ж : Т$. Очевидно, что

$$Ж = V_{ж}\gamma_{ж} \text{ и } Т = V_B\gamma_B. \quad (3)$$

Здесь $\gamma_{ж}$ и γ_B — объемный вес выщелачивающего раствора и горной массы в пределах V_B соответственно.

Объемный вес горной массы обычно без больших погрешностей можно принять равным объемному весу руды γ_p . Если $Ж : Т = f$, то

$$V_{ж} = \frac{V_B\gamma_p f}{\gamma_{ж}}. \quad (4)$$

Среднюю концентрацию урана в продуктивном растворе за весь период эксплуатации находим из следующего выражения:

$$C_{ср} = \frac{P\varepsilon}{V_{ж}} = \frac{mc\gamma_{ж}\varepsilon}{Mf}. \quad (5)$$

Коэффициент f показывает, какое весовое количество выщелачивающего раствора необходимо пропустить через единицу веса руды для достижения коэффициента извлечения ε . Он будет достигнут тем быстрее, чем выше эффективная пористость горной массы $n_{эфф}$.

Как следует из изложенного, применение способа подземного выщелачивания позволяет ограничить подсчет запасов определением приведенной удельной объемной продуктивности и подсчетом общего количества металла, сосредоточенного в выщелачиваемом объеме. Вместе с этим весьма важное значение приобретает эффективная пористость горной массы. Очевидно, что чем больше эффективная пористость, тем лучше условия для взаимодействия выщелачивающего раствора с рудными минералами. Отсюда вытекает одна из главных задач разведки — определение эффективной пористости горных пород, слагающих рудное тело и заполняющих выщелачиваемый объем, и выделение по этому признаку промышленных типов руд. Руды, не обладающие эффективной пористостью, должны выделяться из общего количества запасов и относиться к числу непромышленных (для способа подземного выщелачивания), так как извлечения металла из них при подземном выщелачивании практически не происходит.

Необходимое для выщелачивания металла количество жидкой фазы в объемном выражении можно найти следующим образом:

$$V_{ж} = V_B n_{эфф} f. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5) и учитывая (1), получим

$$C_{ср} = \frac{P\varepsilon}{n_{эфф} f V_B} = q_{пр} \frac{\varepsilon}{n_{эфф} f}. \quad (7)$$

При разведке и изучении месторождений для подземного выщелачивания в дальнейшем открывается полная возможность отказаться от

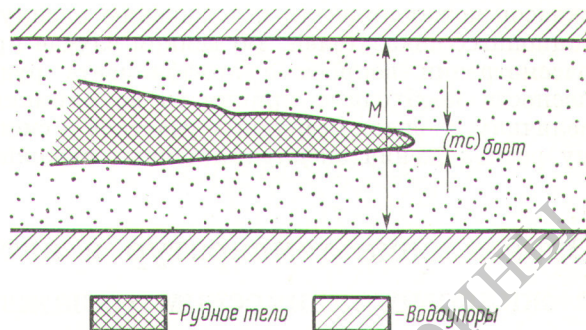
подсчета запасов руды и определения необходимых для этого параметров — удельного и объемного весов и естественной влажности.

Необходимо, однако, подчеркнуть, что в настоящее время такой подсчет должен проводиться, поскольку каждое месторождение следует рассматривать, исходя из возможности отработки его как горным способом, так и способом подземного выщелачивания.

Таким образом, для подсчета запасов необходимо определение следующих параметров: 1) содержания металла в единице объема рудного тела или данного промышленного типа руды (q_p , кг/м³) и в единице выщелачиваемого объема ($q_{пр}$, кг/м³); 2) эффективной пористости по литологическим разностям руд; 3) спрессованной средней мощности рудного тела и рудной площади; 4) средней мощности продуктивного пласта; 5) бортового содержания металла по сечению; 6) бортового метропроцента (метрограмма) для оконтуривания рудных площадей; 7) минимального промышленного содержания металла в объеме или части объема рудного тела.

Для определения содержаний металла и эффективной пористости необходимо использовать образцы керна с ненарушенной структурой. Возможно также прямое определение этих параметров в скважинах геофизическими методами (нейтронный каротаж, эффект Мёсбауэра, электрокаротаж и др.). Определение остальных параметров, кроме минимального промышленного содержания и бортового метропроцента для оконтуривания рудных площадей, должно проводиться по данным геологоразведочных работ.

Для определения минимального промышленного содержания металла в каждом конкретном случае необходимо проводить технико-экономические расчеты методом вариантов. Это содержание должно как минимум обеспечивать возврат капитальных затрат на строительство предприятия и эксплуатационных расходов на добычу полезного ископаемого. Большое влияние на величину минимального промышленного содержания оказывает положение контура рудной площади. От этого зависит также полнота использования недр: чем больше рудная площадь, на которой ведется выщелачивание, тем больше урана может быть извлечено. Но, как известно, в периферийных частях рудного тела содержания обычно снижаются, что при выщелачивании приводит к обеднению продуктивных растворов.



Р и с. 2. Схема выбора бортового метропроцента при подземном выщелачивании.

Для оконтуривания рудной площади необходимо найти минимальный метропроцент или метрограмм по ограничивающему ее контуру, при котором остается рентабельной добыча металла из данного рудного тела. Определение этой величины связано с большими трудностями. В первом приближении представляется возможным руководствоваться следующими соображениями.

При извлечении из продуктивных растворов металла небольшая его часть (остаточная концентрация $C_{ост}$) остается в хвостовых растворах, с которыми после их доукрепления растворителем возвращается в голову процесса — в недра. Пусть контур рудной площади пересекает рудное тело таким образом, что в этом пересечении оно имеет мощность и содержание (рис. 2), характеризующиеся величиной mc . Если при выщелачивании содержащегося в данном пересечении металла до коэффициента извлечения ϵ в пласте мощностью M образуется концентрация, равная $C_{ост}$, то это пересечение можно принять за бортовой метропроцент или метрограмм $(mc)_{борт}$. Его значение определяется из формулы (5):

$$(mc)_{борт} = \frac{C_{ост} M f}{\gamma_{ж} \epsilon} \quad (8)$$

Следовательно, величина бортового метропроцента или бортового метрограмма определяет образование продуктивного раствора с остаточной концентрацией металла $C_{ост}$ по всей мощности продуктивного пласта. Чем больше M , тем большим должен быть $(mc)_{борт}$.

Вопрос о коэффициенте рудоносности при подземном выщелачивании месторождений урана заслуживает особого рассмотрения, поскольку движение растворов происходит как по рудным, так и по безрудным участкам. Простое исключение последних из подсчета

запасов может привести к искажению эксплуатационных показателей. Во всяком случае при рассмотрении вопроса о коэффициенте рудности необходимо принимать во внимание величину площади безрудных участков и систему расположения эксплуатационных скважин.

В заключение следует сказать, что изложенные в настоящей статье соображения высказываются в порядке обсуждения и в дальнейшем, возможно, будут пересмотрены.

Поступила в Редакцию 24/VII 1969 г.

Определение температур в активной зоне ядерного реактора с жидкометаллическим охлаждением

Н. И. БУЛЕЕВ, В. Е. ЛЕВЧЕНКО, К. Н. ПОЛОСУХИНА, А. А. ШОЛОХОВ

УДК 621.039.517.5

Теплообмен в активной зоне ядерного реактора обладает особенностями, которые необходимо учитывать при расчете температур. Традиционный метод расчета температур поверхности по коэффициенту теплоотдачи α не учитывает неравномерности тепловыделения по высоте активной зоны. При определении температуры твэла по коэффициенту теплоотдачи расчет ведется по формуле [1, 2]

$$t_c(z) = t_{ж. вх} + \frac{F_T}{Gc_p} \int_0^z q_V(z) dz + \frac{q_V(z) F_T}{\alpha P}. \quad (1)$$

Здесь t_c — температура поверхности твэлов; $t_{ж. вх}$ — температура теплоносителя на входе в канал; $q_V(z)$ — объемное тепловыделение, переменное по высоте активной зоны и постоянное в поперечном сечении канала; F_T — поперечное сечение топливного материала; G — весовой расход; c_p — удельная теплоемкость теплоносителя; z — координата, отсчитываемая от входа в канал по направлению движения теплоносителя; P — периметр теплообмена. Второй член формулы (1) представляет собой подогрев теплоносителя от входа в канал до рассматриваемого поперечного сечения, в котором определяется температура поверхности, а последний член правой части формулы — локальный температурный перепад от стенки к жидкости, определяемый как отношение локального удельного теплового потока к поверхности к локальному коэффициенту теплоотдачи.

Обычно в расчетах по формуле (1) используется значение коэффициента теплоотдачи, найденное при постоянном по длине канала тепловом потоке. Но величина коэффициента теплоотдачи, формально определяемого как отношение локального теплового потока к локальной разности температур, существенно зависит от распределения тепловыделения

вдоль канала. Поэтому в некоторых случаях формула (1) приводит к неверным результатам [3].

Есть простой и универсальный метод расчета температур в активной зоне, который свободен от недостатков, присущих методу расчета по коэффициенту теплоотдачи. Этот метод основан на принципе суперпозиции. Для расчета температур в тепловыделяющем канале здесь необходимо лишь знать изменение температуры вдоль канала при постоянном по длине тепловыделении. Применение принципа суперпозиции для учета продольного изменения тепловыделения приводит к так называемому интегралу Дюамеля [3], с помощью которого можно рассчитывать температуры в любой точке канала.

Однако тепловыделение в активной зоне изменяется не только в продольном, но и в поперечном направлениях. При изменении тепловыделения в поперечном направлении расчет по коэффициенту теплоотдачи приводит к еще большим трудностям. Так, коэффициент теплоотдачи в кольцевом канале зависит от соотношения между потоками на внутренней и внешней поверхностях кольцевого зазора и может принимать самые различные значения, вплоть до нулевых, а также бесконечно большие положительные и бесконечно большие отрицательные значения [4, 5].

Однако и здесь применение принципа суперпозиции значительно облегчает задачу расчета температур. Для расчета температур в какой-либо точке при произвольном распределении источников тепла в поперечном сечении канала достаточно знать температуры в этой точке за счет действия каждого из источников тепла в отдельности.

Ниже этот метод излагается применительно к расчету температур в пакетах (пучках) стержневых твэлов.