

## **ВОСХОДЯЩАЯ МИГРАЦИЯ ФЛЮИДА ПУТЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ТРЕЩИН В ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

**Жатнуев Н.С.**

*Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, E-mail: [zhat@gin.bsc.buryatia.ru](mailto:zhat@gin.bsc.buryatia.ru)*

В условиях пластических деформаций в «голове» отдельных замкнутых трещин и/или систем замкнутых трещин с флюидом создается избыточное флюидное давление, превышающее литостатическое. При определенной величине, превышающей прочность пород, избыточное давление флюида может привести к распространению трещины вверх путем гидроразрыва пород при одновременном смыкании в хвостовой части, что приведет к поступательному движению трещины и/или системы трещин вверх. Избыточное флюидное давление в трещине прямо пропорционально плотности вмещающих пород, протяженности трещин и обратно пропорционально плотности флюида в трещине.

## **TRANSITION OF FLUIDS BY MIGRATION OF CLOSED CRACKS IN PLASTIC ROCKS**

**Zhatnuev N.S.**

*Geological institute SB RAS, Ulan-Ude E-mail: [zhat@gin.bsc.buryatia.ru](mailto:zhat@gin.bsc.buryatia.ru)*

Under conditions of plastic deformations in “head” of separate closed cracks and/or closed crack systems containing fluids the surplus fluid pressure higher than lithostatic is created. At certain value, exceeding rock’s power of strength the surplus fluid pressure can cause upward crack expansion through rock hydrofracturing with simultaneous healing in the tail part thus resulting in progressive upward movement of the crack and/or crack system. The surplus pressure is in direct proportion to length the crack and inversely fluid density.

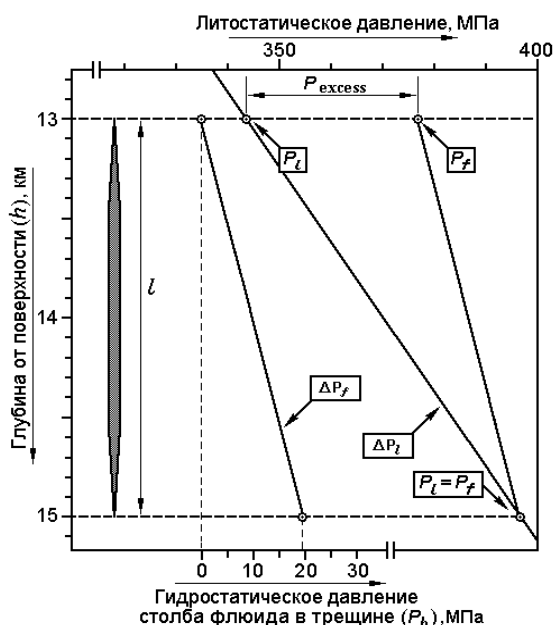
Геофизическими и экспериментальными исследованиями показано, что породы на глубинах 6 – 33 км подвержены пластическим деформациям [2-5]. По модели [3-5] верхние этажи земной коры подверженные хрупким деформациям и отделяются от нижних, пластичных, по границе  $K_1$ . Между ними находится упрочненный слой, названный «барьерной зоной» и характеризующийся отсутствием в породах трещинного и порового флюида, ниже которого отмечается тектонический шов - «отделитель» [5]. Через «барьерную зону» временами происходит прорыв флюидов с резким падением давления и температуры и интенсивным минералообразованием [5, 8]. В области хрупких деформаций флюид в трещинном пространстве находится под гидростатическим давлением, а в области пластических деформаций (ниже «барьерной зоны») – под полным литостатическим давлением (ЛД). ЛД на

трещинно-поровый флюид обуславливает снятие упрочнения пород под влиянием эффектов Терцаги и Ребиндера [3-5, 7] и определяет их вязкое течение при низких скоростях деформации. Однако, пластификация различных пород происходит при различных Т-Р параметрах [4]. Например, в зоне пластичности сиалических пород габброиды еще не теряют своей прочности, хотя на более глубоких горизонтах они также вязко текут. При потере прочности под воздействием указанных факторов породы приобретают склонность к гидроразрыву при небольших избыточных давлениях флюида, находящегося в трещинах и полостях, но прорыв жестких пород барьерной зоны требует значительного повышения давления.

Известно достаточно много работ, особенно в нефтяной геологии, об аномально высоких пластовых давлениях, обеспечивающих гидроразрыв и разрушение пород. Наблюдения на Кольской СГ-3 показали, что временами в ствол скважины происходили прорывы флюидов с давлением намного превышающим гидростатическое [5].

Возникает вопрос, чем обусловлено локальное повышение давления в полостях, если нет локального повышения температуры?

Автором предложена модель формирования высоких избыточных давлений флюида в трещинных полостях и модель миграции трещин в зоне пластических деформаций путем гидроразрыва. Давление гидроразрыва пород во время Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) оценивалось в 3 - 30 МПа [1]. Максимальные напряжения гидроразрыва, по этим данным, не превышают десятков МПа. Практика добычи нефти [6] показывает, что начальное образование трещины

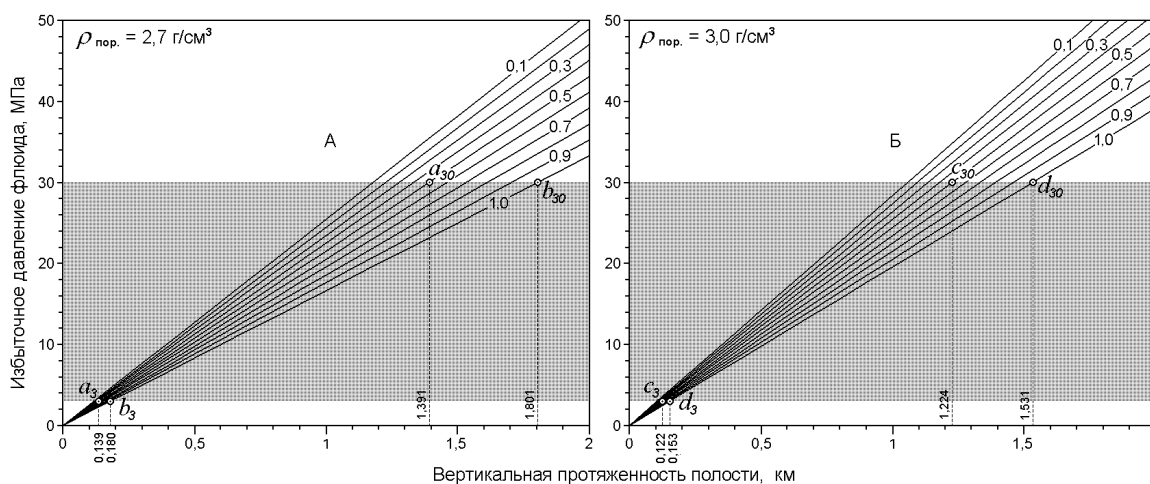


**Рис. 1.** Схематическая диаграмма, поясняющая образование ИДФ в голове трещины:  $l$  – вертикальная протяженность трещины;  $\Delta P_f$  и  $\Delta P_l$  – гидростатический и литостатический градиенты;  $P_l$  – величина литостатического давления в головной части трещины;  $P_f$  – величина давления флюида в головной части трещины;  $P_{excess}$  – величина избыточного давления флюида в головной части трещины;  $P_l = P_f$  – литостатическое давление и давление флюида на стенку трещины в хвостовой части

гидроразрыва требует заметно больших усилий, чем распространение уже существующих. Данные из этих источников относятся к области упругости материала при естественной прочности пород.

Давление флюида, находящегося в замкнутом поровом пространстве ниже «барьерной зоны», соответствует ЛД, а в головной части протяженных по вертикали трещин оно существенно превышает таковое. Флюид передает ЛД с основания (хвостовой части) трещины в ее головную часть за вычетом собственного гидростатического давления и чем протяженнее полость, тем значительнее разница между ЛД и флюидным давлением вверху трещины (рис. 1). В хвостовой части давление флюида на стенку трещины равно ЛД. В связи с этим в голове трещины происходит гидроразрыв, а в хвосте - смыкание трещины. То есть трещина при относительном постоянстве объема будет передвигаться вверх.

На рисунке 2 представлена зависимость ИДФ в голове трещины от плотности

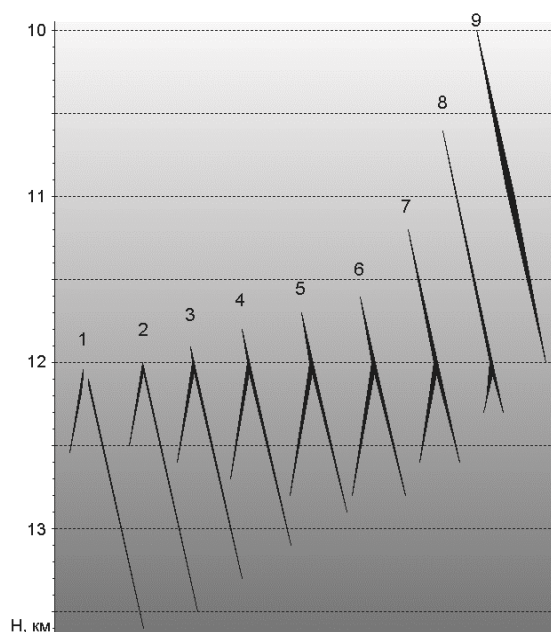


**Рис. 2.** Зависимость ИДФ в голове трещины от плотности, содержащегося в ней флюида, и плотности вмещающих пород в условиях пластических деформаций. А – графики ИДФ при плотности породы  $2,7 \text{ г/см}^3$ , Б – при  $3,0 \text{ г/см}^3$ . На изолиниях показаны плотности флюида. Заштрихована область давлений гидроразрыва при прорыве БТТИ [1]. Проекция точек  $a_3$  и  $a_{30}$  на горизонтальную ось показывают интервал длин трещин, которые могут распространяться путем гидроразрыва при плотности флюида  $0,5 \text{ г/см}^3$  и плотности вмещающих пород  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Проекция точек  $b_3$ ,  $b_{30}$  - то же при плотности флюида  $1,0 \text{ г/см}^3$ . Проекция точек  $c_3$ ,  $d_3$ ,  $c_{30}$ ,  $d_{30}$  – аналогичные величины для плотности пород  $3 \text{ г/см}^3$ .

вмещающих пород, плотности флюида и вертикальной протяженности полости трещины. Из диаграммы следует, что чем выше плотность флюида, тем большая протяженность трещины требуется для осуществления гидроразрыва пород и начала движения трещины вверх. Так, во вмещающей породе с плотностью  $2,7 \text{ г/см}^3$  при плотности флюида  $0,5 \text{ г/см}^3$  ИДФ в 30 МПа (величина замеренных на БТТИ [1])

давлений) достигается при длине трещины 1,391 км, а при плотности флюида 1,0 г/см<sup>3</sup> - при длине 1,801 км (рис. 2А, проекции точек  $a_{30}$  и  $b_{30}$  на горизонтальную ось). Кроме того, при одной и той же длине трещины и плотности флюида ИДФ будет выше в породах с большей плотностью. Так, при плотности породы 3 г/см<sup>3</sup> при тех же плотностях флюида ИДФ в 30 МПа достигается уже при протяженности трещин в 1,224 и 1,531 км, т.е. при меньших значениях длины (рис. 2Б, проекции точек  $c_{30}$  и  $d_{30}$ ). Минимальные значения давлений гидроразрыва (3 МПа), приведенные в [1], достигаются, соответственно, при протяженности трещин 0,139 и 0,180 км при плотности пород 2,7 г/см<sup>3</sup>; 0,122 и 0,153 км при плотности пород 3,0 г/см<sup>3</sup> (рис.2, проекции точек  $a_{30}$  и  $b_{30}$ ,  $c_{30}$  и  $d_{30}$  на горизонтальную ось).

Из диаграмм (рис. 2) также следует, что при одних и тех же плотностях флюида и пород ИДФ будут выше в более протяженных по вертикали трещинах. Соответственно, можно допустить, что длинные разрывы будут перемещаться



**Рис. 3.** Кинограмма эволюции системы трещин, движущихся в поле градиента давления: 1 – 9 – стадии процесса. На стадии 1 показаны две движущиеся трещины, которые на стадии 2 соединяются. В результате слияния в нижнем конце левой трещины ИДФ возрастает, и она начинает расти снова вниз (стадии 2-5) до того момента, пока уровни левой и правой ветвей не сравняются (стадия 6). Все это же время правая ветвь схлопывается. После выравнивания левой и правой ветвей они начинают схлопываться одновременно. При этом протяженность трещины начинает ускоренно расти и, соответственно, растут ИДФ и скорость движения.

быстрее коротких. **Рисунок 3** показывает схематическую кинограмму движения системы из двух трещин, на которой более длинная трещина догоняет короткую и смыкается с ней. В результате общая длина резко возрастает и также резко увеличивается ИДФ в головной части, что аналогично гидравлическому удару. При таком развитии процесса трещины могут прорывать барьеры из более прочных пород не подверженных пластификации.

Из изложенного представляется возможным сделать следующие выводы.

1. В области пластических деформаций литосферы в голове протяженных по

- вертикали трещин, содержащих флюид, создаются избыточные давления, значения которых существенно выше литостатического и зависят от плотности флюида и вмещающих пород, а также от протяженности трещин по вертикали.
2. При величине, превышающей предел прочности пород, ослабленных под влиянием эффектов Терцаги и Ребиндера, избыточное флюидное давление может привести к распространению трещины вверх путем гидроразрыва, а поскольку объем флюида ограничен, то в хвостовой части трещины будет происходить смыкание стенок, что приведет к поступательному движению трещины и/или системы трещин вверх.
  3. Более протяженные трещины, вероятно, будут иметь большую скорость миграции, в результате чего они будут догонять короткие и поглощать их. Результат такого слияния – мгновенное увеличение общей протяженности и, соответственно, мгновенное увеличение избыточного давления в голове трещины, что сродни гидравлическому удару. Такой процесс может обеспечить прорыв более прочных пород (барьера по С.Н.Иванову).
  4. Известны «телетермальное золото-серебряные месторождения», у которых не имеется видимой связи жильных тел с источником рудного вещества (например м-е Дукат, м-е Асхатин в Монголии). Вероятно, процесс движения флюидсодержащих трещин может объяснить отрыв рудоносных жил от интрузивных тел, являющихся источником, и тепловое поле которых приводит к разупрочнению и пластификации вмещающих пород.

Исследование выполнено при поддержке гранта НШ-2284.2003.5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большое трещинное Толбачинское извержение. Под ред. Федотова С. А. // М.: Наука, 1984,- 637 с.*
2. *Ващилов Ю.Я. Блоково-слоистая модель земной коры и верхней мантии. М.: Наука, 1984, 240 с.*
3. *Иванов С.Н. Докл. АН СССР.1990. Т.311, N2. С.428 - 431.*
4. *Иванов С.Н. Зоны пластичных и хрупких деформаций в вертикальном разрезе литосферы // Геотектоника,1990а. №2. С.3 - 14.*
5. *Иванов С.Н. Роль флюидов в реологической стратификации земной коры с учетом данных сверхглубокого бурения. Кольская скважина СГ-3 // Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УРО РАН, 2002, 152 с.*
6. *Курьянов Ю.А., Чиркин И.А., Кокшаров В.З. В кн.: Труды школы семинара «Физика нефтяного пласта» 20-24 мая 2002 г. Новосибирск, 2002.С.167-171.*
7. *Перцов Н.В. Коллоидный журнал, 1998, том 60, №5. с. 629-640.*
8. *Fournier R. Econot. Geology . 1999.V 94, N8. P.1193 – 1211.*