

УДК 622.753.627.767

*В.А. Козлов***ДЕЙСТВИЕ СИЛ КАПИЛЛЯРНО-ВАКУУМНОГО
МЕХАНИЗМА ПРОНИКНОВЕНИЯ ВОДЫ
В ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ МЕРЗЛОЙ
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ**

При изучении процесса взаимодействия мерзлых песчано-глинистых осадочных пород с водной средой, установлено, что разрушаемость мерзлых пород в водной среде выше, чем талых, так в ходе экспериментов по размокаемости образцов мерзлых глинистых горных пород Т.Н. Жесткова [1] делает вывод, что грунты, подвергшиеся промораживанию, размокают быстрее грунтов, ранее не промерзавших, независимо от их влагонасыщения и криогенного строения. Промораживание образцов глинистых грунтов сопровождается их растрескиванием с образованием многочисленных, в большинстве случаев невидимых невооруженным глазом микротрещин различного простиранья. По этим трещинам происходит разрушение грунтов в процессе их размокания. В данном случае под термином «размокаемость» понимается способность грунта терять связность с частичной или полной потерей несущей способности при взаимодействии со спокойной водой.

В работе [2] указывается, что в практике расчетов температурного и влажностного режимов почв иногда приходится учитывать водопроницаемость мерзлых почв. В результате выполнения лабораторных экспериментов и полевых исследований Л.Н. Степанов пришел к выводу, что инфильтрация в мерзлую

почву может иметь место при наличии в ней свободных ото льда сообщающихся пор или трещин и температуре почвы, равной 0°C.

Общим недостатком проведенных исследований является отсутствие в них подробного анализа физических механизмов, приводящих к ускоренному разрушению мерзлых грунтов по сравнению с талыми при их контакте с водной средой.

Рассмотрим силы, действующие в поверхностном слое мерзлой песчано-глинистой горной породы при ее помещении в водную среду.

Можно предположить, что водопроницаемым по существу является поверхностный слой мерзлой горной породы, имеющий трещины, образующиеся при ее промерзании, и проникновение воды в поверхностный слой мерзлой песчано-глинистой горной породы обусловлено капиллярными силами. Основой капиллярного движения является молекулярное взаимодействие жидкости с твердым телом на границе раздела: воздух – жидкость – твердое тело.

Минеральные частицы и лед мерзлых песчано-глинистых пород хорошо смачивается водой, т.е. силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше чем силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела. Поверхность воды, находящейся внутри

поры (трещины), образует вогнутый мениск. Поскольку радиус кривизны поверхности воды на контакте с твердыми телами очень мал, то образование менисков может заметно происходить в узких порах (трещинах), радиус которых менее 1 мм. В дальнейшем поры (трещины) такого размера будем называть капиллярами.

Радиус капилляра r и радиус мениска ρ связаны между собой зависимостью:

$$r = \rho \cdot \cos \theta, \text{ м}, \quad (1)$$

где θ – краевой угол смачивания, образованный между поверхностью твердого тела и касательной к изогнутой поверхности мениска жидкости.

Если угол смачивания равен нулю, то говорят о полном смачивании. А.В. Лыков в работе [3] отмечает, что в случае полного смачивания на стенках капилляра образуется неподвижный слой адсорбированной влаги толщиной $\delta \approx 10^{-7}$ м и, следовательно, действие капиллярных сил будет проявляться только в капиллярах радиусом $10^{-3} - 10^{-7}$ м.

Известная формула Лапласа позволяет определить дополнительное капиллярное давление, оказываемое на жидкость со стороны сферической поверхности мениска:

$$P_k = \frac{2\sigma}{\rho}, \text{ Па}. \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, численно равный силе, приложенной к единице длины края поверхностной пленки жидкости, Н/м.

Вогнутая поверхностная пленка мениска уменьшает давление жидкости по сравнению с давлением жидкости под плоской пленкой. Таким образом, при вогнутой поверхности мениска жидкость будет двигаться в капилляр при помещении его конца в воду.

В дальнейшем для простоты рассуждений будем рассматривать условия

полного смачивания водой стенок капилляров, принимая, что внутри капилляра $\rho = r$, поперечное сечение капилляра любой неправильной формы представляет собой круг и при капиллярном передвижении столбик воды обладает свойством неразрывности (сплошности).

Гидростатическую составляющую давления воды P_z , зависящую от глубины погружения устья капилляра, не будем учитывать в дальнейших расчетах, т. к. капиллярное давление возле свободной поверхности воды в несколько раз превосходит гидростатическое давление.

Таким образом, по формуле (2) можно оценить глубину капиллярного проникновения воды в мерзлую горную породу при контакте ее поверхности с водной средой.

Известно, что движение воды в горизонтальном цилиндрическом капилляре, конец которого находится в воде, описывается уравнением [3]:

$$\frac{d^2h}{d\tau^2} + \frac{1}{l} \left(\frac{dh}{d\tau} \right)^2 + \frac{8\eta}{r^2\gamma_B} \frac{dh}{d\tau} - \frac{2\sigma}{\rho\gamma_B h} = 0, \quad (3)$$

где h – длина столбика воды в капилляре в момент времени τ ; r – радиус капилляра; l – длина капилляра; ρ – радиус мениска; η – коэффициент динамической вязкости; γ_B – плотность воды; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Если пренебречь первыми двумя слагаемыми второй степени малости уравнение (3) можно записать в более простом виде:

$$V_{кан} = \frac{dh}{d\tau} = \frac{r^2\gamma_B}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r\gamma_B h} \right) = \frac{r\sigma \cos \theta}{4\eta \cdot h}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где $V_{кан}$ – линейная скорость капиллярного движения воды.

Из этого уравнения видно, что в начальный момент времени (когда длина столбика воды в капилляре очень мала, т. е. $h \rightarrow 0$) скорость капиллярного движения стремится к бесконечно большой величине. Таким образом, капилляр небольшой длины заполняется водой за счет капиллярных сил фактически мгновенно. Вода, быстро движущаяся в капилляре мерзлой горной породы, не успевает замерзнуть и достигает максимальной глубины проникновения, которая определяется из равенства давления сжатого воздуха в закрытом капилляре давлению воды на воздух за счет капиллярных сил.

Таким образом, можно предложить, что разрушение мерзлых песчано-глинистых горных пород при их контакте в водной среде связано с фильтрацией воды под действием капиллярных сил в поверхностный слой горной породы по микротрещинам, образующимся при ее замораживании.

Как описано выше, действие капиллярных сил будет проявляться в капиллярах радиусом 10^{-3} – 10^{-7} м.

Вода, попавшая в поры меньшего размера, является, в основном, физически связанной и, в принципе, неподвижна. В порах же большого размера (более 1 мм) силы поверхностного натяжения слабо себя проявляют. Для нас, с точки зрения естественной фильтрации воды в поверхностный слой образцов мерзлых сыпучих горных пород, интерес представляют трещины, имеющие размер поперечного сечения, при котором проявляются капиллярные силы. В этих трещинах вода, за счет смачивания стенок капиллярных трещин и поверхностного натяжения, будет двигаться по трещине, и сжимать имеющийся в ней воздух, до тех пор, пока силы давления под вогнутой поверхностью мениска во-

ды не будут уравновешены давлением сжатого воздуха.

Для отрыва частицы от поверхности образца горной породы необходимо выполнение условия, чтобы сила давления сжатого в капиллярной трещине воздуха F_k превосходила силу сцепления между частицами $F_{сц}$: $F_k > F_{сц}$.

Силу давления воздуха в трещине можно определить по формуле:

$$F_k = P_k S = 2\sigma_b S/R, \text{ Н}, \quad (5)$$

где P_k - избыточное давление воздуха, определяемого из уравнения закона Лапласа, Па; σ_b - поверхностное натяжение воды, равное 0.076 Н/м; S - поверхность по которой происходит давление воздуха на частицу, м²; R - средний радиус трещины, м.

При рассмотрении сил сцепления частиц мерзлой сыпучей горной породы между собой необходимо учесть, что частицы разделены прослойками льда, которые образуют ледовый каркас, и тонкими пленками физически связанной воды, так как согласно работы [4] рыхло-связанная вода не замерзает до -10 °С, а прочно-связанная вода не замерзает до -70 °С.

Таким образом, сжатый в трещинах воздух может совершить работу по сдвигу частиц по поверхностям скольжения, проходящим по пленкам физически-связанной воды, и их отделения от поверхности образца. Этот эффект будет проявляться особенно ярко на ребрах образца мерзлой песчано-глинистой горной породы.

Сила сцепления между частицами:

$$F_{сц} = C S_k, \text{ Н}, \quad (6)$$

где C - коэффициент сцепления между частицами, Н/м²; S_k - площадь контакта между частицами, м².

Коэффициент сцепления между частицами определяется экспериментально, и его значение находится в пределах: $\tau_0 < C < \sigma_{р.л.}$, где τ_0 - напряжение сдвига между

слоями физически связанной воды, согласно работы [4] $\tau_0 = 10$ Па; $\sigma_{р.л.}$ - предельное напряжение растяжения льда (1 МПа).

Следовательно, чем меньше первоначальная влажность образца горной породы до замораживания и, естественно, его льдистость, после замораживания, тем быстрее разрушается мерзлая песчано-глинистая горная порода при ее размочивании в воде.

С течением времени нахождения мерзлой горной породы в воде поверхностный слой протаивает, и, как следствие, уменьшается его прочность на сдвиг и разрыв. Таким образом, избыточное давление воздуха в капиллярных трещинах приводит к отрыву отдельных оттаявших частиц от поверхности горной породы.

По формуле (5) можно вычислить избыточное давление P_k газа (воздуха), сжатого в закрытом капилляре водой из-за действия капиллярных сил, в зависимости от радиуса капилляра. При расчете глубины проникновения воды в закрытый с одной стороны капилляр, принималось, что изменение состояния газа в капилляре при сжатии описывается уравнением политропического процесса:

$$p \cdot V^n = \text{const}, \quad (7)$$

где p – давление газа; V – объем газа в капилляре. В случае допущения, что процесс сжатия воздуха в капилляре изотермический, показатель политропы $n = 1$, т. к. теплоемкость $c = \infty$ при $dT = 0$.

По вычисленной глубине проникновения воды в закрытые капилляры, длинами 0,1 и 1,0 мм, вычислялась площадь действия давления сжатого в капилляре воздуха на частицу горной породы кубической формы объемом 1 мм^3 , и

предполагалось, что ось капилляра расположена параллельно поверхности частицы горной породы, далее рассчитывалась сила давления воздуха на частицу F_d .

Кроме капиллярных сил, в мерзлой горной породе при движении внутрь породы теплового фронта проявляют себя вакуумные силы. При фазовом превращении льда в воду объем, занимаемый льдом, уменьшается на 8,3 %, и в этом пространстве образуется вакуум, вследствие чего происходит засасывание воды в капилляр за счет разницы давлений воды в капилляре и контактирующей с горной породой водной средой. В этом случае вакуум в капилляре будет действовать на расположенную рядом частицу горной породы, приводя к ее сдвигу в сторону капилляра, относительно других частиц, а также будет действовать на воду, контактирующую с устьем капилляра, втягивая ее в капилляр.

На рис. 1 показаны графики капиллярной и вакуумной сил, действующих на воду, втягивая ее в капилляр. Капиллярная сила рассчитывалась из условия того, что капилляр заполнен воздухом, а при расчете вакуумной силы, предполагалось, что первоначально объем капилляра полностью заполнен льдом, который при нагреве превращается в воду.

На рис. 2 показаны в логарифмическом масштабе расчетные графики проявления капиллярных и вакуумных сил, действующих со стороны односторонних капилляров длиной 0,1 и 1,0 мм в зависимости от радиуса капилляров на частицу горной породы объемом 1 мм^3 . Для сравнения показана сила тяжести частицы (горизонтальная линия).

По графикам на рис. 2 можно сделать заключение, что в капиллярах длиной 0,1 мм и радиусом более 10^{-5} м сила давления воздуха со стороны

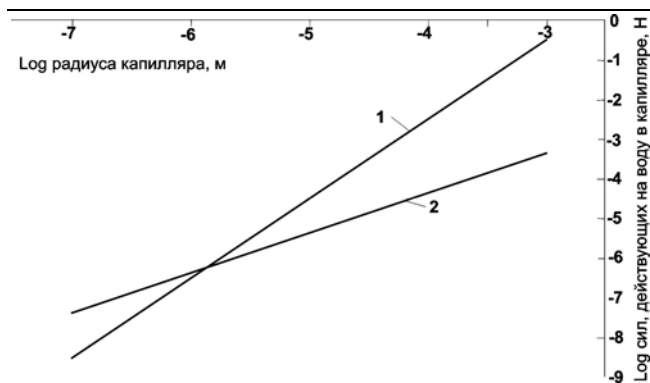


Рис. 1. Соотношение капиллярной (2) и вакуумной (1) сил, действующих на воду, втягивая ее в капилляр

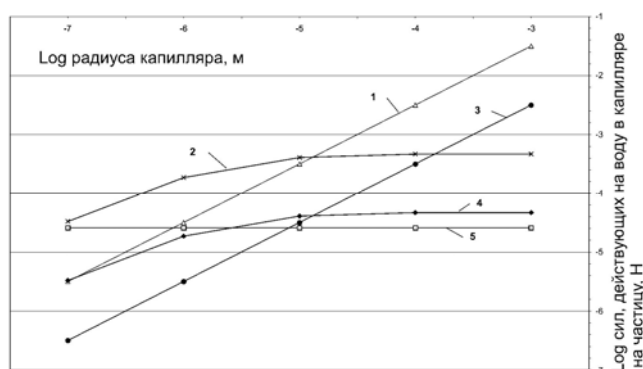


Рис. 2. Соотношение капиллярных и вакуумных сил, действующих в капиллярах длиной 1,0 мм (1, 2) и 0,1 мм (3, 4) на частицу кубической формы объемом 1 мм³: 2, 4 – графики силы давления сжатого воздуха на частицу в закрытом капилляре; 1, 3 – графики вакуумной силы со стороны капилляра на частицу; 5 – сила тяжести частицы

одного капилляра сопоставима с силой тяжести частицы, а вакуумная сила при радиусе капилляра 10^{-3} м на два порядка превосходит силу тяжести частицы. Сила давления воздуха и вакуумная сила, действующие на частицу со стороны капилляра длиной 1,0 мм в зависимости от радиуса ка-

пилляра на порядок превосходят силы, действующие в капилляре длиной 0,1 мм. Зная распределение количества капиллярных трещин в мерзлой песчано-глинистой горной породе по радиусу и длине, можно оценить действие капиллярных и вакуумных сил, действующих со стороны капилляров на частицы горной породы. В случае, когда величина равнодействующей этих сил превысит силы сцепления частицы с рядом расположенными частицами горной породы, частица отделится от массива горной породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жесткова Т.Н. Формирование криогенного строения пород. - М.: Наука, 1982.
2. Степанов Л.Н. Водопроницаемость мерзлых почв // Вопросы агрономической физики. Л., 1957.
3. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. - М.: Гостехиздат, 1954.
4. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. - Новосибирск: Наука, 1988.

Коротко об авторах

Козлов В.А. – кандидат технических наук, доцент, Московский государственный горный университет.