

ՄԱՂԱՆՈԹԱՅԻՆ ԿԱԽՎԱԾ ՋՐԵՐԻ ԵՎ ԿԱԽՑԱԼ ԳԵՏՆԱՋՐԵՐԻ ՀՈՐԻՋՈՆՆԵՐԻ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ՄԱՍԻՆ¹

Պրոֆեսոր, տեխն. գիտ. դոկտոր Գեորգ Տեր-ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ²

Ռեֆերատ: Մաղանոթային կախված ջրերի և գետնաջրերի ժամանակավոր կախյալ հորիզոնների վարքը բացատրվում է մաղանոթային սիստեմների հատկություններով և այդ սիստեմներում ու շրջապատող միջավայրում հեղուկի հավասարակշռության պայմաններով: Շեշտվում է մենիսկների կորության և այդ սիստեմների պլեդոմետրիկ մակարդակների գրավիտացիոն պոտենցիալների նշանակությունը:

Մաղանոթային սիստեմների տեսությունը բացատրում է մաղանոթային կախված ջրերի ձևավորման և զարգացման յուրահատկությունները: Այդ ջրերը կարող են հավասարակշռության մեջ լինել արտաքին միջավայրի հետ: Գետնաջրերի ժամանակավոր կախյալ հորիզոններ չեն կարող լինել հավասարակշռության մեջ ներքևում գտնվող գետնաջրերի հաստատուն հորիզոնների հետ: Մաղանոթային կախված ջրերի տեղաբաշխման տիպերից մեկը հիմնված է մաղանոթային սիֆոնացման երևույթի վրա: Ցույց է տրված սողանքների առաջացման հնարավորությունը մաղանոթային սիֆոնացման հետևանքով:

Գրականության մեջ կարելի է գտնել բազմաթիվ փաստեր, որոնք վերաբերում են մաղանոթային կախված ջրերի և կախյալ գետնաջրերի ժամանակավոր հորիզոններին (Лебедев, 1936; Роде, 1952; Atterberg, 1908; Zunker, 1930; Terzaghi, 1939)³. այդ տիպի ջրերի ձևավորման մեխանիզմի մի որոշ յուրահատկությունների բացատրությունը կարելի է գտնել մաղանոթային սիստեմների հատկությունների մեջ:

ՄԱՂԱՆՈԹԱՅԻՆ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՈՒՌԹՅՈՒՆԸ ԱՐՏԱՔԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՀԵՏ

Մաղանոթային սիստեմ հասկացվում է ծակոտեղենային պինդ մարմին, բավականին նեղ և անփակ դատարկություններով, որոնք իրենցից ներկայացնում են կամավոր կտրվածք և ուրվագիծ ունեցող մաղանոթային անցքերի միադոմարություն և իրենց մեջ պարունակում են հեղուկ, որի թրջման եզրային անկյունը պինդ մարմնի նյութի հետ 90° -ից նվազ է:

Մաղանոթային սիստեմի հեղուկի իզոթերմիկ հավասարակշռության ընդհանուր պայմանը արտահայտվում է մաղանոթային սիստեմի երկու կամա-

¹ Հաֆայում (Իզրայիլ) 1967 թ. կայացած Գրունտների մեխանիկայի և հիմքաշինության երրորդ Ասիական ռեգիոնալ կոնֆերանսին ներկայացված վերամշակված զեկուցում: Զեկուցումը հրատարակվել է կոնֆերանսի աշխատություններում (G. Ter-Stepanian, On the mechanism of suspended capillary water and perched groundwater. Proceedings, Third Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Haifa (Israel), 1967, vol. I, p. 179—181).

² ՀՍՍՀ ԳԱ Երկրաբանական գիտությունների ինստիտուտի գեոմեխանիկայի բաժնի վարիչ:

³ Գրականությունը տես էջ 84:

յական M_1 և M_2 կետերում հեղուկի մակերևույթի միջին K_1 և K_2 կորուստներին հարաբերություններով

$$K_1 = K_2 - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g(z' - z''), \quad (1)$$

որտեղ ρ_1 -դիտվող հեղուկի խտությունն է, ρ_2 արտաքին միջավայրի (օդ, գոլորշի կամ մի ուրիշ հեղուկ) խտությունն է,

α -հեղուկի մակերևույթային ձգտումն է, g -ծանրության ուժի արագացումն է, և z' ու z'' -մի որոշ մակարդակից հաշված M_1 և M_2 կետերի բարձրությունը:

Եթե M_2 կետը ունի այն հատկությունը, որ հեղուկի մակերևույթը այնտեղ հավասար է զրոյի, այսինքն եթե $K_2 = 0$, ապա (1) արտահայտությունը ունի հետևյալ ձևը՝

$$K_1 = - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g(z' - z''), \quad (2)$$

ուր $g z''$ այդ կետի պոտենցիալն է գրավիտացիոն դաշտում:

M_2 կետին վերագրենք ծանրության ուժի զրոյական պոտենցիալը և ինդեքսով ներքևում նշենք դրանից հաշված մազանոթային սիստեմի կետերի բարձրությունները: Հեղուկի միջին կորուստյան զրոյին հավասարության պայմանը չպետք է միշտ նշանակի հեղուկի հարթ մակերևույթի գոյությունը. դրա համար բավարար է, որ գլխավոր կորուստյան շառավիղները ունենան հավասար չափով և հակադարձ նշանով մեծություններ: Մասնավոր դեպքում վիճակոր կորուստյան երկու շառավիղներն էլ կարող են հավասարվել անվերջության, այսինքն հեղուկի մակերևույթը կարող է լինել հարթ:

Զրոյական պոտենցիալ կունենան մի շարք կետեր, որոնց երկրաչափական դրությունը կորոշի հեղուկի պլեզոմետրիկ մակարդակը. այն կարող է որոշվել ուսումնասիրվող մազանոթային սիստեմի մեջ մտցրած պլեզոմետրներին միջոցով:

Համեմատականության գործակիցը (2) բանաձևում իրենից ներկայացնում է α^2 մազանոթային հաստատունի (Պուասոնի հաստատունի) հակադարձ մեծություն, $\alpha^2 = 2\alpha / [(\rho_1 - \rho_2)g]$: Ուստի

$$K_1 = - \frac{z_1}{\alpha^2}, \quad (3)$$

այսինքն գրավիտացիոն դաշտում գտնվող մազանոթային սիստեմի ամեն մի կետում հեղուկի մակերևույթի միջին կորուստները հավասար է այդ կետի հեղուկի պլեզոմետրիկ մակարդակից հաշված բարձրության հարաբերությանը՝ հեղուկի մազանոթային հաստատունին: Մազանոթային սիստեմի այն վայրում, որը գտնվում է պլեզոմետրիկ մակարդակից ցածր հնարավոր է թրջման եզրային անկյունների անցումը մազանոթային անցքերի ճակատին կամ մազանոթային սիստեմի արտաքին մակերևույթին (Тер-Степанян, 1950): Այդպիսի անցման հետևանքով հարևան մազանոթային անցքերի եզրային թրջման անկյունները կծածկեն մեկը մյուսին, որը կբերի համապատասխան հարևան մենիսկների միաձուլմանը: Որպես հետևանք կստեղծվի փոքր կորուստյամբ հոծ մակերևույթ. այդպիսի մակերևույթի կողմից ստեղծած հավելյալ ճնշումը պետք է համարել հավասար զրոյի: Ուստի մազանոթային սիստեմի պլեզոմետրիկ մակարդակը չի կարող բարձրանալ ավելի բարձր, քան դիտվող սիստեմի ամենացածր կետը:

Եթե մազանոթային սիստեմի պլեզոմետրիկ մակարդակը լինի ավելի բարձր քան դրա մի որևէ մասը, ապա այդ մասից կկատարի հեղուկի դուրս թափումը սիստեմից: Դրա հետևանքը կլինի հեղուկի քանակի նվազումը սիստե-

մում և համապատասխանորեն կփոխվի հեղուկի մակերևույթի կորույթունը: Այդ կրերի մազանոթային սիստեմի պլեզոմետրիկ մակարդակի իջեցմանը: Սիստեմից հեղուկի դուրս թափումը և մակարդակի իջեցումը կշարունակվի մինչև պլեզոմետրիկ մակարդակը կհասնի սիստեմի ամենացածր կետին:

Եթե մազանոթային սիստեմը հաղորդվում է արտաքին գազային միջավայրի հետ, ապա հավասարակշռության պայմանները կորոշվեն մազանոթային սիստեմի հեղուկ ֆազայի և արտաքին գազային միջավայրի մեջ մոլեկուլյար փոխանակումով: Այդ փոխանակման հետևանքով հեղուկի քանակը սիստեմում փոխվում է, որը անդրադառնում է սիստեմի պլեզոմետրիկ մակարդակի դիրքի վրա:

Տեղագրենք մազանոթային սիստեմը փակ իզոտերմիկ խցի մեջ, ուր գտնվում է նույն հեղուկով անոթ, որը զբաղեցնում է մազանոթային սիստեմի ծակոտիները, և դիտենք հավասարակշռության պայմանները այս դեպքում (Тер-Степанян, 1952): Բնական է, որ հեղուկը կգոլորշիանա ինչպես մազանոթային սիստեմի մակերևույթից, այնպես և անոթից: Հեղուկի գոլորշիացման գույքնից հոլորշու ճնշումը խցում կաճի, իսկ գոլորշիացման արագությունը կնվազի: Երբ գոլորշին դառնա հագեցված, հետագա գոլորշիացումը կդադարի, և կհաստատվի հավասարակշռությունը:

Ընդունենք, որ p_0 —հագեցված գոլորշու ճնշումն է: Ստույգ ասելով, այդպիսի ճնշում կունենա միայն գոլորշու բարակ շերտը, որը գտնվում է անմիջապես անոթում հեղուկի մակերևույթի վրա: Այդ մակերևույթից z բարձրության վրա p_v գոլորշու ճնշումը, ըստ հիդրոստատիկ հավասարակշռության օրենքի, կկազմի՝

$$p_v = p_0 - \rho_2 g z: \quad (4)$$

Մենիսկների մակերևույթների կորացման հետևանքով հագեցված գոլորշու ճնշման մեծությունը փոխվում է. այն կազմում է՝

$$p_m = p_0 + 2\sigma K \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2}: \quad (5)$$

Հավասարակշռության դրությունում հագեցված գոլորշու ճնշումը մենիսկների վրա (բանաձև 5) պետք է հավասար լինի գոլորշու ճնշման մեծությանը շրջապատող միջավայրում (բանաձև 4), $p_v = p_m$: Հակառակ դեպքում, ճնշումների տարբերության հետևանքով կկատարվեր հեղուկի գոլորշիացումը, կամ կոնդենսացումը, կախված այդ տարբերության նշանից: Այստեղից՝

$$K = - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\sigma} g z = - \frac{z}{a^2}: \quad (6)$$

Համեմատելով (6) և (3) բանաձևերը եզրակացնում ենք, որ մազանոթային սիստեմի ծակոտիները զբաղեցնող հեղուկի և իզոտերմիկ մեկուսացված խցում նույն հեղուկի ազատ մակերևույթի հավասարակշռության պայմանը է մազանոթային սիստեմի հեղուկի պլեզոմետրիկ մակարդակի համընկնումը անոթում հեղուկի մակարդակի հետ:

Այդպիսով ոչ մի տարբերություն չկա այն դեպքի մեջ, երբ անոթում հեղուկը անմիջապես հաղորդվում է մազանոթային սիստեմը զբաղեցնող հեղուկի հետ, և այն դեպքի մեջ, երբ այդպիսի անմիջական հաղորդում չկա: Վերջին դեպքում կապը իրականացվում է հագեցված գոլորշու միջոցով:

Եթե մեկուսացված խցում գտնվում է ոչ թե մեկ մազանոթային սիստեմ, ինչպես քննարկվեց վերևում, այլ մի քանի այդպիսի սիստեմներ, ապա այս դեպքում ևս այդ բոլոր սիստեմների պլեզոմետրիկ մակարդակների դիրքը պետք է փոխվի այնպես, որ դրանք համընկնեն խցում գտնվող սննթում հեղուկի մակարդակի հետ: Այդպիսով արդյունքը կլինի նույնը, ինչպես և այն

դեպքում, եթե բոլոր մազանոթային սիստեմաները անմիջապես հաղորդվելին իրար մեջ, և անոթում՝ հեղուկի հետ:

Այստեղից դժվար չէ տեսնել, որ եթե խցում գտնվում են միայն մազանոթային սիստեմաներ, այսինքն բացակայում է հեղուկով անոթը, ապա այս դեպքում ևս հաստատվում է մեկ ընդհանուր պնդումներին մակարդակ, այսինքն կատարվում է պնդումներին մակարդակների հավասարեցում: Այս պահին սիստեմաների մի մասի պնդումներին մակարդակը իջնում է, իսկ մյուսները՝ բարձրանում:

Բոլորովին կարևոր չէ, որ իջնի ավելի բարձր տեղադրված սիստեմաների պնդումներին մակարդակը և բարձրանա ավելի ցածր տեղադրվածներինը: Այդ ընթացքում սիստեմաների գրավիտացիոն ուժերի պոտենցիալները ոչ մի նշանակություն չունեն: Էական են միայն այդ սիստեմաների պնդումներին մակարդակների գրավիտացիոն պոտենցիալները, քանի որ տեղի է ունենում միայն փակ տարածություն մեջ գտնվող սիստեմաներ՝ հենց այդ մակարդակների հավասարեցում:

Եթե ավելի բարձր գտնվող սիստեմը ունենա նույնպես և ավելի բարձր պնդումներին մակարդակ, ապա հավասարեցման ժամանակ կիջնի. այդ մակարդակը: Սակայն հնարավոր է և այնպիսի դեպք, երբ ցածր հորիզոնում տեղադրված մազանոթային սիստեմը ունի հարաբերաբար ավելի բարձր պնդումներին մակարդակ համեմատ մի ուրիշ, հիպոտեմներին ավելի բարձր տեղադրված սիստեմի հետ: Այդ դեպքում պնդումներին մակարդակների հավասարեցման ժամանակ առաջի սիստեմի պնդումներին մակարդակը կիջնի, իսկ երկրորդինը՝ կբարձրանա: Ֆիզիկապես դա նշանակում է, որ հեղուկը կգոյրջիանա ավելի ցածր տեղադրված մազանոթային սիստեմի ծակոտիներին և կկոնդենսացվի ավելի բարձր տեղադրված սիստեմի ծակոտներում:

Առանձին մազանոթային սիստեմաների պնդումներին մակարդակների հավասարեցումից հետո կհաստատվի հավասարակշռություն վիճակը: Այն կբավարարի վերևում ձևակերպված պայմանին՝ յուրաքանչյուր մազանոթային սիստեմի ցանկացած կետում հեղուկի մակարդակի միջին կորությունը պետք է հավասար լինի բոլոր մազանոթային սիստեմաների հեղուկի ընդհանուր պնդումներին մակարդակից հաշված՝ այդ կետի բարձրության հարաբերությանը՝ հեղուկի մազանոթային հաստատունին: Այդպես է որոշվում մազանոթային սիստեմաներ լցնող հեղուկի հավասարակշռությունը արտաքին մեկուսացված գազային միջավայրի հետ:

Նկատենք որ, ստացած արդյունքները կարող են դուրս բերվել նշելով թերմոդինամիկայի այն դրույթից, որ հաղորդվող սիստեմներում անցման մեխանիզմը ոչ մի ազդեցություն չի կատարում հավասարակշռության հաստատման վրա:

ՄԱԶԱՆՈՒՄՅԱՆ-ԿԱԽՎԱԾ ԶՐԻ ՀԱՎԱՍԱՐԱԿՇՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆԸ

Գետնաջրերի հաստատուն հորիզոնից բարձր տեղադրված ջրերի մեխանիզմի հասկացողության մեջ մեծ ավանդ դրեց պրոֆ. Կ. Տերզագին (Terzaghi, 1949): Նա ցույց տվեց մասնավորապես մազանոթային կախված ջրերի և կախյալ գետնաջրերի ժամանակավոր հորիզոնների վարքի տարբերությունը:

Վերը շարադրված մազանոթային սիստեմաների սեսությունը թույլ է տալիս հեշտությամբ պատկերացնել մազանոթային-կախված ջրի և զրանից ցածր ջրակալուն շերտի վրա տեղադրված 1 գետնաջրերի հաստատուն հորիզոնի հավասարակշռությունը. այս հորիզոնը համապատասխանում է հեղուկ միջավայրի պնդումներին մակարդակին (նկ. 1, ձախից):

Գետնաջրերի մակարդակի վերևում գտնվում է մազանոթային 3 եղրաշերտը, որը երբեմն կոչվում է մազանոթային հագեցման գոտի:

Այդ եղրաշերտի Շ₁ բարձրությունը որոշում են մազանոթային բարձրաց-

⁴ Նկարները տես էջ 85:

ման հայտնի բանաձևից, ճշտելով այն՝ եզրային անկյան նկատմամբ, և ներկայացնելով այսպես՝

$$z_1 = \frac{a^2 \cos \theta_H}{r_1}$$

որտեղ r_1 գրունտի ծակոտինների միջին տրամագիծն է:

θ_H անկյունը համապատասխանում է չոր մակերևույթին ջրի վրահոսելու պայմանին, քանի որ մազանոթային եզրաշերտի սնումը կատարվում է ներքևից: Ինչպես հայտնի է, գրունտում ջրի բարձրացման դեպքում մազանոթային հագեցումը կատարյալ չի լինում, և այդ գոտու միայն մի մասն ունի հագեցման առավելագույն աստիճան (Lambe and Whitman, 1968):

Մազանոթային կախված 4 գոտին գտնվում է գետնաջրերի պնդումների և մակարդակից z_2 և z_3 ուղղաձիգ հեռավորությունների միջև: Համապատասխան մակարդակներում մենիսկների կորուսյունը կազմում է $K_2 = -z_2/a^2$ և $K_3 = -z_3/a^2$.

Դրանց միջև տեղադրած 5 գոտին կարող է պարունակել առավել նեղ մազանոթներ զբաղեցնող միջընդհատվող ջուր: Վերին՝ 6 գոտին տարվա խոնավ ժամանակ պարբերաբար լինում է մազանոթային հագեցված, իսկ չոր ժամանակ պարունակում է միջընդհատվող ջուր. ջրի ծախսը կատարվում է վերին մենիսկների մակերևույթից՝ գոլորշիացման եղանակով, բուսերի արմատների միջոցով և այլն:

Քանի որ 4 գոտում մազանոթային կախված ջրի սնումը կատարվում է վերևից, վերին մենիսկների եզրային անկյունը համապատասխանում է հետհոսման պայմաններին, իսկ ներքին մենիսկներինը՝ վրահոսման: Զուրը պահանջվում է թրջված գոտու վերին և ներքին սահմաններ կազմող մենիսկների ամբարձիչ ուժերի տարբերության հաշվին և որոշվում դրանց կորուսյամբ:

Այստեղից երևում է, որ մազանոթային կախված ջուրը կարող է գտնվել հավասարակշռության մեջ շրջապատող միջավայրի հետ և հիպոսոմետրիկ՝ ցածր տեղադրված գետնաջրերի հաստատուն հորիզոնի հետ, որովհետև ջուրը գրունտում պահվում է թրջման հիստերիզիսի հետևանքով, իսկ դրա մենիսկների կորուսյունը համապատասխանում է հավասարակշռության պայմաններին:

Որոշենք մազանոթային կախված ջրի գոտու սահմանային հաստությունը: Հորիզոնական կտրվածքի F մակերեսի վրա մազանոթային կախված գոտին վերևից սահմանող մենիսկների P_3 ամբորձիչ ուժը կազմում է $P_3 = z_3 F \rho g$, որտեղ z_3 վերին մենիսկների տվյալ ձևին համապատասխանող մազանոթային բարձրացման բարձրությունն է. եթե մազանոթային սիստեմը պատկերացնենք r շառավիղ ունեցող ուղղաձիգ խողովակների ձևով, ապա՝

$$z_3 = \frac{a^2 \cos \theta_0}{r}, \quad (8)$$

որտեղ θ_0 խոնավ մակերևույթին համապատասխանող թրջման եզրային անկյունն է (հետհոսման անկյուն). այդ ուժը ուղղված է դեպի վերև:

Նույն F մակերեսի վրա մազանոթային կախված գոտին, ներքևից սահմանող մենիսկների P_2 ներքև ձգող ուժը, կազմում է $P_2 = z_2 F \rho g$, որտեղ z_2 ներքին մենիսկների ձևին համապատասխանող մազանոթային բարձրացման բարձրությունն է. համամանորեն՝

$$z_2 = \frac{a^2 \cos \theta_H}{r}, \quad (9)$$

որտեղ θ_H չոր մակերևույթին համապատասխանող թրջման եզրային անկյունն է (վրահոսման անկյուն). այդ ուժը ուղղված դեպի ներքև:

Մազանոթային կախված ջրի գոտում սահմանների մեջ գտնվող F մակերես և h բարձրության ջրի սյան P_1 կշիռը կազմում է $P_1 = hF\sigma g$: Այն պահվում է հավասարակշռության մեջ՝ նշված ուժերի տարբերության հաշվին՝ $P_1 = P_3 - P_2$, մազանոթային կախված ջրի գոտու կրիտիկական հաստության մեծությունը ստանում ենք օգտագործելով (8) և (9) բանաձևերը՝ $h = z_3 - z_2$ կամ՝

$$h = \frac{a^2(\cos\theta_0 - \cos\theta_H)}{r} \quad (10)$$

Մազանոթային կախված գոտու հաստությունը մոտավորապես հաշվարկելու համար ընդունենք, որ գրունտի ծակոտիների տրամագիծը հավասար է 0,002 մմ կամ $r = 0,0001$ սմ: Եզրային թրջման անկյունների մեծությունները ընդունում ենք ինչպես ապակու և ջրի համար (Ադամ, 1947)՝ հետհոսման անկյուն $\theta_0 = 0^\circ$ և վրահոսման անկյուն $\theta_H = 40^\circ$, ջրի մազանոթային հաստատուն $a^2 = 0,15$ սմ²:

Մտցնելով (10) բանաձևի մեջ, ստանում ենք՝

$$h = \frac{0,15(1 - 0,76)}{0,0001} = 3,6 \text{ մ:}$$

Գրունտի մեջ ջրի քանակը որոշ սահմանից ավելանալու դեպքում, օրինակ, երբ ջուրը մեծ քանակով լցնում է վերևից, ջրի կշիռը գերազանցում է նշված ամբարձիչ ուժերի տարբերությանը, և կախված ջրի հավասարակշռությունը խախտվում է:

Միջին հատիկավոր գրունտներում (մասնիկներ մոտավորապես 0,05-ից մինչև 1 մմ սահմաններում) կատարվում է ջրի արագ իջեցում՝ առանձին լեզուների ձևով, ուր հոսում է կախված ջրի մեծ մասը՝ և գրունտում մնում է միայն պենդուլարային ջուր: Այդ առհասումը կատարվում է բավականին հեշտ, և հետևաբար, գործնականորեն միջին հատիկավոր գրունտներում շին առանցում մազանոթային կախված ջրեր:

Առավել մանրահատիկ գրունտներում ջրի առհասելը կատարվում է դանդաղ, առհասման հետ զուգահեռ կատարվում է ջրի գոլորշիացումը ցածր մեխանիկների մակերևույթից և դրա կոնդենսացումը գետնաջրերի մակերևույթին: Նրբահատիկ գրունտներում մազանոթային-կախված գոտուց ջրի այդ անցման ձևը ստանում է գերադասելի նշանակություն: Այդպիսի անցումը տեղի է ունենում մինչև հաստատվում է հավասարակշիռ դրություն: Այսպիսով գետնաջրերը կարող են ավելանալ մթնոլորտային տեղումների հաշվին՝ չունենալով հիդրավլիկ կապ ներթափանցվող ջրերի հետ:

ԳԵՏՆԱԶՐԵՐԻ ԿԱԽՅԱԼ ԵՎ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՐԻԶՈՆՆԵՐԻ ՓՈԽԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ

Գետնաջրերի հաստատուն հորիզոններից բարձր տեղադրված առավել թափանցելի նյութից (կոպիձ, խոշորահատ ավազ) կաղմված ոսպնյակներում տարվա խոնավ ժամանակ գոյանում են կախյալ գետնաջրերի ժամանակավոր հորիզոններ, որոնց վրա ստեղծվում է մազանոթային եզրաշերտ (նկ. 1, ա-բից): Տարվա չոր ժամանակ կախյալ գետնաջրերի հորիզոնները անհայտանում են: Մազանոթային կախված ջրերի հաստատուն հորիզոնները տեղայնանում են, երբեմն, այն տեղամասերի վերևից, որտեղ առաջանում են կախյալ գետնաջրերի ժամանակավոր հորիզոններ:

Կախյալ հորիզոնի ջրերի մակարդակը գտնվում է դրա ներքևում ընկած հաստատուն հորիզոնի ջրերի մակարդակից զգալի բարձր: Այդ իրադրությունը համապատասխանում է այն դեպքին, երբ մի խցում գտնվում են տարբեր պլեզոմետրիկ մակարդակներ ունեցող երկու մազանոթային սխստեմներ:

Ասածից երևում է, որ կախյալ գետնաջրերի հորիզոնները չեն կարող գտնվել հավասարակշռության մեջ շրջապատող միջավայրի հետ և հիպոստմատրիկ՝ ցածր տեղադրված գետնաջրերի հաստատուն հորիզոններին հետ, քանի որ մեծ խիսկների կորուսյունը չի համապատասխանում հավասարակշռության պայմաններին, և փակ միջավայրում պետք է կատարվի պնդամետրիկ մակարդակների հավասարեցում, որի հետևանքով ջուրը հոսում է դեպի ներքև:

ՄԱԶԱՆՈՒԹԱՅԻՆ ՍԻՖՈՆՈՒՄ ԳԱԶԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՄԻՋՈՎ

Գրունտների մեխանիկայում հայտնի մանրահատիկ գրունտների միջով մազանոթային սիֆոնումը ներկայացնում է մազանոթային կախյալ ջրերի լուրահատուկ դեպք, երբ ջուրը գտնվում է շարժման մեջ: Նկ. 2-ի վրա ցույց է տրված ձախ կողմում ընկած ջրամբարի ափի կտրվածքը: Այստեղ 1- արմատական պինդ, գործնականորեն անջրթափանց ապարներն են. 2-ջրամբարի հատակում տեղադրված ճալաքարի շերտը: 3-շերտը գծագրի վրա ստվերագծած է: Վերևում տեղադրված է 4 շերտը՝ միջին մերձակավ, որը ծածկած է ծանր կավի 5 շերտով (Тер-Степанян, 1953).

Եթե ենթադրենք, որ 3 շերտը հանդիսանում է նույն միջին մերձակավը, ինչպես և դրա վերևում տեղադրված 4 շերտը, կարող է տեղի ունենալ մազանոթային սիֆոնում՝ մանրահատիկ գրունտի միջով: Այս դեպքում, հնարավոր էր ջրի բարձրացումը 3+4 շերտի միջով մազանոթային բարձրացման հ բարձրության վրա, վերաթափում ջրամբարի կատարի վրայով և անցումը ջրամբարի գավաթին հակառակ լանջի կողմը: Այստեղ, մերձակավի 3+4 շերտը ստորերկրյա սիֆոնի դերն է կատարում:

Սակայն ջրամբարից հնարավոր է ծծանցման և մի ուրիշ դեպք: Ենթադրենք, որ գծագրի վրա շտվերագծած 3 շերտը նույնպիսի խոշորաբեկոր ճալաքար է, ինչպես և դրանից ցած ընկած 2 շերտը: Ընդունված կարծիքով, գծագրի վրա ներկայացված ջրամբարի գավաթի երկրաբանական կառուցվածքը բացառում է ջրի ծծանցումը գրունտի մեջ, քանի որ գավաթը շրջապատող ապարները բարձրանում են գավաթում ջրի մակարդակից բարձր, իսկ սիֆոնային էֆեկտը չի կարող տեղի ունենալ՝ ճալաքարում մազանոթային բարձրացման բացակայության պատճառով: Իրոք, նշված շերտի վրայից հորատած 7 հորատանցքում սկզբում երևում է չոր ճալաքարը և միայն որոշ խորության վրա՝ ջրատար ճալաքարը. ճալաքարում գետնաջրերի Կ մակարդակը համընկնում է ջրամբարում ջրի մակարդակի հետ:

Չնայած դրան, եթե բավականին խիտ ծանր կավի 5 շերտը կարելի է գործնականորեն դիտել, ինչպես ջրա- և ռանթափանցելի շերտ, ապա պարզվում է, որ չոր ճալաքարի շերտը, ընկած լինելով գետնաջրերի մակարդակից վրան, կարող է լինել ջրի թափանցման ուղի, մնալով, սակայն, չոր: Եթե ծանր կավի 5 շերտը, գտնվելով 2+3 ճալաքարի և 4 մերձակավի շերտերի վերևում, մեկուսացնում է արտաքին մթնոլորտից ներքևում տեղադրված տարածությունը, ապա այս դեպքում 4 գոտին կարող է դիտվել ինչպես մազանոթային սիստեմ՝ 2+3 փակ խցի վրա, որի մեջ կա Կ մակարդակ ունեցող հեղուկի ազատ մակերևույթ: Դրա հետևանքն է մազանոթային սիստեմի 3 պնդամետրիկ մակարդակի միաձուլումը նշված Կ մակարդակի հետ:

Այստեղից բխում է, որ այն պայմանները, որոնցում գտնվում է մերձակավի 4 շերտի ծակոտիները զբաղեցնող մազանոթային ջուրը, ոչնչով չեն տարբերվում վերևում վերլուծված դեպքից, երբ շտվերագծած 3 վայրը հանդիսանում է մերձակավ և, երբ կարող է տեղի ունենալ մազանոթային սիֆոնման երևույթը:

Դրա հետևանքով մերձակավի 4 շերտում առաջանում է ջրի հոսք, ինչպես ցույց է տրված սլաքներով: 4 շերտի ջրի պակասումը լրացվում է գետնաջրերի մակարդակից՝ ջրի գոլորշիացման միջոցով. ջուրը գոլորշու ձևով կտեղափոխվի չոր 2+3 ճալաքարի միջով 4 մերձակավի ներքևի մակերևույթը, ապա այդ

Многие факты, относящиеся к поведению капиллярно-подвешенных вод и временных горизонтов висячих грунтовых вод, содержатся в литературе (Лебедев, 1936; Роде, 1952; Atterberg, 1908; Zunker, 1930; Terzaghi, 1949)³; объяснение некоторых особенностей механизма формирования этих типов вод можно найти в свойствах капиллярных систем.

РАВНОВЕСИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ СИСТЕМ С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ

Под капиллярной системой понимается пористое твердое тело, обладающее достаточно узкими и незамкнутыми пустотами, представляющими собой совокупность сообщающихся капиллярных ходов произвольного сечения и очертания с находящейся в ней жидкостью, краевой угол смачивания которой с веществом твердого тела меньше 90° .

Общее условие изотермического равновесия жидкости в капиллярной системе, выражается соотношением между средней кривизной K_1 и K_2 поверхности жидкости в двух произвольных точках M_1 и M_2 капиллярной системы, находящихся на высотах z' и z'' от некоторого начала отсчета (Тер-Степанян, 1951):

$$K_1 = K_2 - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g(z' - z''), \quad (1)$$

где ρ_1 — плотность рассматриваемой жидкости,
 ρ_2 — плотность внешней среды (воздух, пар или другая жидкость),
 α — поверхностное натяжение жидкости и
 g — ускорение силы тяжести.

Если точка M_2 обладает тем свойством, что средняя кривизна поверхности жидкости в ней равна нулю, т. е. $K_2 = 0$, то выражение (1) имеет вид:

$$K_1 = - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g(z' - z''), \quad (2)$$

где gz'' — потенциал такой точки в гравитационном поле.

Припишем точке M_2 нулевой потенциал силы тяжести и будем обозначать индексом внизу отсчитанные от нее высоты точек капиллярной системы. Условие равенства нулю средней кривизны жидкости не должно всегда означать существования плоской поверхности жидкости; для этого достаточно, чтобы радиусы главной кривизны имели равные по величине и противоположные по знаку значения. В частном случае оба радиуса главной кривизны могут равняться бесконечности, т. е. поверхность жидкости может быть плоской.

Нулевым потенциалом будет обладать ряд точек, геометрическое место которых определит пьезометрический уровень жидкости; он может быть определен с помощью пьезометра, введенного внутрь изучаемой капиллярной системы.

Коэффициент пропорциональности в формуле (2) представляет собой величину, обратную капиллярной постоянной (постоянной Пуассона) $a^2 = 2\alpha/[(\rho_1 - \rho_2)g]$. Поэтому

$$K_1 = - \frac{z_1}{a^2}, \quad (3)$$

³ Литературу см. на стр. 84.

ները քայքայման գոտում հավասար են սահքի մնացորդային դիմադրութեանը, լանջը ենթարկվում է դանդաղ կայունացված սողքի և շարժումը չի բերում սողանքի: Սողքի ընդհանուր մեխանիզմը կարող է բաժանվել երկու փուլի: Առաջին փուլում կազմավորվում է անընդհատ քայքայման գոտի՝ վերը նկարագրված առաջընթաց քայքայման դեպքում: Երբ ներքև պատկած կավից այդ ճանապարհով շերտ է անջատվում, սկսվում է սողքի շարժման երկրորդ փուլը: Սկզբունքորեն շերտի պաշարի գործակիցը հավասար է մեկի կավի ամեն մի կողմնային ընդարձակումը հետագա դեզինտեգրացիայի ժամանակ առաջացնում է համապատասխան շարժում, և քանի որ լանջով ներքև սողալու դիմադրությունը լինում է աննշան, տեղի է ունենում սողքի լանջիվար:

Իհարկե, շարժումը կլինի ոչ կանոնավորված և անհամասեռ: Սողքին ուղեկցվող ուժեղ ճաքճքման հետևանքով ծակոտկենային ճնշումը քայքայման գոտում ղգալիորեն տատանվում է տեղումների ժամանակ:

Այդ պատճառով էլ սողքը ունի սեզոնային բնույթ: Քանի որ շարժումները նպաստում են ավելի քիչ խախտված կավի և անարատ կավի բեկորների դեզինտեգրացիային, ապա դա տանում է մնացորդային դիմադրության հետագա նվազեցման և սողքի տեղական արագացման:

Բավականաչափ փոքրաթեք լանջերում ծանրութեան ուժից առաջացած շոշափող ուժերը փոքր են, քան սահքի մնացորդային դիմադրությունը. այդ լանջերը չեն ենթարկվում գրավիտացիոն սողքի: Թուլացման կետերում կարող են տեղի ունենալ ներքին լարումներից առաջացող որոշ կողմնային շարժումներ, բայց դրանք չեն ազդի լանջի կայունության վրա: Ժամանակի ընթացքում վերին շերտը փափկում է և ներքին կողմնային լարումները նվազում են. գլխավոր լարումների հարաբերության ամենամեծ արժեքը ֆունկցիա է հանդիսանում կավի սահքի դիմադրությունից:

Լանջերի սողքի դիտարկումները Կալիֆոռնիայում, ԱՄՆ

Կավային լանջերի սողքի վերաբերյալ շատ քիչ հետազոտություններ են հրատարակվել: Դրանց են վերաբերում Կալիֆոռնիայի արևմտյան ծովափի մի քանի լանջերի սողքի պատկերի բավականաչափ լրիվ նկարագրությունը. ներառյալ երկու լանջ՝ համեմատաբար ուժեղ կապերով երրորդական հասակի հույժ գերկոնսոլիդացված ծովային կավերում և լանջերի ունեին տարբեր թեքություններ, ուղղաբերձ դարափից մինչև փոքրաթեք լանջերը (9°): Հետաքննությունները ներգրավել էին նաև ծակոտկենային ճնշման և տարբեր խորություններում՝ ինկլինոմետրների միջոցով շարժումների չափումներ: Ուսումնասիրված լանջերից մեկը ուներ 40 մ բարձրություն, շատ փոքր թեքություն 10° անկյունով (նկ. 9): Լանջը ցուցաբերում է շատ թե քիչ անընդհատ սողունություն՝ շարժման միջին արագությունը տարրում մոտ 30 սմ է: Ինկլինոմետրական չափումների արդյունքներից (նկ. 9) կարելի է անել կարևոր եզրակացություն, որ սողքը առաջանում է վերին շերտի սողունությունում: 14 մ խորությունում տեղադրված լավ արտահայտված սահեցման մակերևույթի կամ քայքայման նեղ գոտու երկայնությամբ: Գրավիտացիոն շոշափող լարումները սահեցման այդ մակերևույթի երկայնությամբ մոտավորապես հավասար են կավի սահքի մնացորդային դիմադրության ($\varphi_r \approx 10-12^\circ$): Թվում է, որ այդ լանջը տիպիկ օրինակ է, երբ անընդհատ սողքը առաջանում է դեզինտեգրացիայի հետևանքով կավի կողմնային ընդարձակումից. այդ մասնավոր դեպքում քիչ է հավանական, որ սողքը կբերի սողանքի: Հետազոտությունները ցույց տվին, որ նույն շրջանում լանջերը ունեն թեքություն 9 -ից մինչև 28° : Ընդունելով $c' = 0$ այդպիսի լանջերի կայունությունը պահանջում է, որ φ' կազմի 12° -ից մինչև 45° : Շրջանի պատմությունը պարզորոշ ցույց է տալիս, որ ժամանակի ընթացքում բոլոր լանջերը, որոնց թեքությունը գերազանցում է $10-12^\circ$ փվելու են, բայց քայքայման ժամանակը կարող է լինել շատ մեծ: Աստիճանաբար սողանքի տանող տեղումային ֆակտորը որոշակիորեն կապված է սողքի

т. е. средняя кривизна поверхности жидкости в любой точке капиллярной системы, находящейся в гравитационном поле, равна отношению высоты этой точки, отсчитанной от пьезометрического уровня жидкости, к капиллярной постоянной жидкости. В той области капиллярной системы, которая расположена ниже пьезометрического уровня, возможен переход краевых углов смачивания на торцы капиллярных ходов или внешнюю поверхность капиллярной системы (Тер-Степанян, 1950). Благоприятствующими условиями являются малая величина угла смачивания, свойственная в частности влажным поверхностям, и малая толщина стенок капиллярных ходов. Вследствие этого перехода краевые углы смачивания соседних капиллярных ходов будут перекрывать друг друга, что приведет к слиянию соответствующих соседних менисков. В результате создается сплошная поверхность малой кривизны; добавочное давление, развиваемое такой поверхностью, следует считать равным нулю. Поэтому пьезометрический уровень в капиллярной системе не может подниматься выше, чем самая нижняя точка рассматриваемой системы.

Если пьезометрический уровень капиллярной системы окажется выше, чем какая-либо ее нижняя часть, то из этой части будет происходить вытекание жидкости из системы. Вследствие этого количество жидкости в системе будет уменьшаться и соответственно будет изменяться кривизна поверхности жидкости.

Это приведет к опусканию пьезометрического уровня в капиллярной системе. Вытекание жидкости из системы и опускание уровня будет продолжаться до тех пор, пока пьезометрический уровень не достигнет самой нижней точки системы.

Если капиллярная система сообщается с внешней газообразной средой, то условия равновесия определяются молекулярным обменом, происходящим между жидкой фазой системы и внешней газообразной средой. В результате этого обмена количество жидкости в системе изменяется, что отражается на положении пьезометрического уровня системы.

Поместим капиллярную систему в замкнутую изотермическую камеру, в которой находится сосуд с той же жидкостью, что заполняет поры капиллярной системы, и рассмотрим условия равновесия в этом случае (Тер-Степанян, 1952). Естественно, что жидкость будет испаряться как с поверхности капиллярной системы, так и из сосуда; по мере испарения жидкости давление пара в камере будет увеличиваться, а скорость испарения уменьшаться. Когда пар делается насыщенным, дальнейшее испарение прекратится и установится равновесие.

Пусть p_0 — давление насыщенного пара. Строго говоря, таким давлением будет обладать только тонкий слой пара, находящийся непосредственно над поверхностью жидкости в сосуде. На высоте z от этой поверхности давление пара p_v , в силу закона гидростатического равновесия, составит:

$$p_v = p_0 - \rho_2 g z. \quad (4)$$

Вследствие искривления поверхностей менисков величина давления насыщенного пара изменяется; она составляет:

$$p_m = p_0 + 2zK \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (5)$$

В состоянии равновесия давление насыщенного пара над мениском (уравнение 5) должно равняться величине давления пара в окру-

жающей среде (уравнение 4), $p_v = p_m$. В противном случае под действием разности давлений происходило бы испарение жидкости или ее конденсация, в зависимости от знака этой разности. Отсюда

$$K = - \frac{p_1 - p_2}{2\alpha} g z = - \frac{z}{a^2}. \quad (6)$$

Сравнивая уравнения (6) и (3), заключаем, что условием равновесия жидкости, заполняющей поры капиллярной системы и свободной поверхности той же жидкости, находящейся в изотермической изолированной камере, является совпадение пьезометрического уровня жидкости в капиллярной системе с уровнем жидкости в сосуде.

Таким образом, нет никакой разницы между случаем, когда жидкость в сосуде непосредственно сообщается с жидкостью, заполняющей капиллярную систему, и тем случаем, когда такого непосредственного сообщения нет. В последнем случае связь осуществляется через атмосферу насыщенного пара.

Если в изолированной камере находится не одна капиллярная система, как это было рассмотрено выше, а несколько таких систем, то и в этом случае положение пьезометрических уровней всех этих систем должно измениться таким образом, чтобы они совпадали с уровнем жидкости в сосуде, находящемся в той же камере. Таким образом, результат был бы тот же, как если бы все капиллярные системы непосредственно сообщались друг с другом и с жидкостью в сосуде.

Отсюда нетрудно видеть, что если в камере находятся одни только капиллярные системы, т. е. отсутствует сосуд с жидкостью, то и в этом случае устанавливается один общий пьезометрический уровень, т. е. происходит нивелирование пьезометрических уровней. При этом пьезометрический уровень одних систем понижается, а других повышается.

Вовсе не является обязательным, чтобы понижался пьезометрический уровень более высоко расположенных систем и повышался уровень низко расположенных. В этом процессе потенциалы гравитационных сил систем не имеют никакого значения. Существенны только гравитационные потенциалы пьезометрических уровней этих систем, так как происходит нивелирование именно этих уровней всех систем, находящихся в рассматриваемом замкнутом пространстве.

Если окажется, что более высоко расположенная система обладает также и более высоким пьезометрическим уровнем, то при нивелировании произойдет понижение этого уровня. Однако возможен и такой случай, когда капиллярная система, расположенная на низком горизонте, обладает относительно более высоким пьезометрическим уровнем по сравнению с другой системой, гипсометрически расположенной выше. В этом случае при нивелировании пьезометрических уровней у первой системы пьезометрический уровень опустится, а у второй — поднимется. Физически это означает, что жидкость будет испаряться из пор более низко расположенной капиллярной системы и конденсироваться в пустотах системы, расположенной на большей высоте.

После того как произойдет нивелирование пьезометрических уровней отдельных капиллярных систем, установится состояние равновесия. Оно будет удовлетворять сформулированному выше условию: средняя кривизна поверхности в любой точке каждой капиллярной системы должна равняться отношению высоты этой точки, отсчитанной от общего пьезометрического уровня жидкости всех капиллярных систем, к капиллярной постоянной жидкости. Так определяется условие равно-

весия жидкости, заполняющей капиллярные системы, с внешней изолированной газообразной средой.

Заметим, что полученные результаты могут быть выведены на основании положения термодинамики о том, что на установление равновесия в сообщающихся средах механизм перехода не оказывает никакого влияния.

УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОДВЕШЕННОЙ ВОДЫ

Большой вклад в понимание механизма вод, расположенных над постоянными горизонтами грунтовых вод, был сделан проф. К. Терцаги (Terzaghi, 1949). Им было, в частности, показано различие поведения капиллярно-подвешенных вод и временных горизонтов висячих грунтовых вод.

Изложенная выше теория капиллярных систем позволяет легко представить условия равновесия капиллярно-подвешенной воды с расположенным ниже нее постоянным горизонтом грунтовых вод 1, залегающим на водоупорном ложе 2; этот горизонт соответствует пьезометрическому уровню жидкой среды (рис. 1, слева)⁴.

Над горизонтом грунтовых вод находится капиллярная кайма 3, называемая иногда зоной капиллярного насыщения.

Высоту z_1 капиллярной каймы можно определить из известного выражения для высоты капиллярного поднятия, уточнив его в отношении краевого угла и представив его так

$$z_1 = \frac{a^2 \cos \theta_H}{r_1}$$

где r_1 — средний радиус пор грунта.

Угол θ_H отвечает условиям натекания воды на сухую поверхность, поскольку питание капиллярной каймы идет снизу. Как известно, в случае поднятия воды в грунте капиллярное насыщение не бывает полным и лишь часть капиллярной зоны обладает наибольшей степенью насыщения (Lambe and Whitman, 1968).

Зона 4 капиллярно-подвешенной воды находится между вертикальным расстоянием z_2 и z_3 от пьезометрического уровня грунтовой воды. Кривизна менисков на соответствующих уровнях составит $K_2 = -z_2/a^2$ и $K_3 = -z_3/a^2$.

Расположенная между ними зона 5 может содержать полупрерывную воду, заполняющую более узкие капилляры. Верхняя зона 6 периодически оказывается капиллярно насыщенной во влажное время года и содержит полупрерывную воду в сухое время; расход воды происходит путем испарения с поверхности верхних менисков, ее потребления корнями растений и т. д.

Поскольку питание капиллярно-подвешенной воды в зоне 4 идет сверху, краевого угол верхних менисков отвечает условиям оттекания, а нижних менисков — натекания. Удержание воды происходит за счет разности подъемной силы менисков, образующих верхнюю и нижнюю границы смоченной зоны и определяемую их кривизной.

Из сказанного видно, что капиллярно-подвешенная вода может находиться в равновесии с окружающей средой и расположенными гипсометрически ниже постоянными горизонтами грунтовых вод, поскольку

⁴ Рисунки см. на стр. 85.

она удерживается в грунте вследствие гистерезиса смачивания, а критическая ее менисков соответствует условиям равновесия.

Определим предельную толщину зоны капиллярно-подвешенной воды. На площади горизонтального сечения F подъемная сила P_3 менисков, ограничивающих зону капиллярно-подвешенных вод сверху, составляет $P_3 = z_3 F \rho g$, где z_3 — высота капиллярного поднятия, соответствующая данной форме верхних менисков. Если представить капиллярную систему в виде пакета вертикальных трубок радиусом r , то

$$z_3 = \frac{a^2 \cos \theta_0}{r}, \quad (8)$$

где θ_0 — краевой угол смачивания для влажной поверхности (угол оттекания); эта сила направлена вверх.

На той же площади F оттягивающая вниз сила P_2 менисков, ограничивающих зону капиллярно-подвешенных вод снизу, составляет $P_2 = z_2 F \rho g$, где z_2 — высота капиллярного поднятия, соответствующая форме нижних менисков; аналогично

$$z_2 = \frac{a^2 \cos \theta_H}{r}, \quad (9)$$

где θ_H — краевой угол смачивания для сухой поверхности (угол натекания); эта сила направлена вниз.

Вес P_3 столба воды площадью F и высотой h , находящейся в пределах зоны капиллярно-подвешенных вод, составляет $P_1 = h F \rho g$. Он удерживается в равновесии за счет разности указанных сил, $P_1 = P_3 - P_2$. Применяя уравнения (8) и (9), получаем величину критической толщины капиллярно-подвешенных вод $h = z_3 - z_2$, или

$$h = \frac{a^2 (\cos \theta_0 - \cos \theta_H)}{r}. \quad (10)$$

Для приближенного подсчета толщины зоны капиллярно-подвешенных вод примем, что диаметр пор грунта равняется 0,002 мм или $r = 0,0001$ см. Значения краевых углов смачивания примем как для стекла и воды (Адам, 1947): угол оттекания $\theta_0 = 0^\circ$, а угол натекания $\theta_H = 40^\circ$; капиллярная постоянная воды $a^2 = 0,15$ см².

Подставляя в уравнение (10), получаем

$$h = \frac{0,15(1 - 0,76)}{0,0001} = 3,6 \text{ м.}$$

При увеличении количества воды в грунте сверх определенного предела, например, при чрезмерном поступлении ее сверху, вес подвешенной воды превосходит указанную разность подъемных сил, и равновесие подвешенных вод нарушается.

В среднезернистых грунтах (частицы приблизительно в пределах от 0,05 до 1 мм) происходит быстрое стекание воды вниз в виде отдельных языков, куда устремляется основная часть подвешенной воды, и в грунте остается только пендулярная влага. Это стекание совершается довольно легко, и поэтому практически в средне-зернистых грунтах капиллярно-подвешенные горизонты вод не образуются.

В более мелкозернистых грунтах стекание воды происходит медленно; наряду со стеканием происходит испарение воды с поверхности нижних менисков и ее конденсация на поверхности грунтовых вод. В

тонкозернистых грунтах этот вид перехода влаги из капиллярно-подвешенных зон приобретает преимущественное значение. Такой переход совершается до тех пор, пока не наступит состояние равновесия. Таким образом, грунтовые воды могут получать питание за счет атмосферных осадков, не имея гидравлической связи с инфильтрующимися водами.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИСЯЧИХ И ПОСТОЯННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД

В линзах 7, сложенных более проницаемым материалом (гравий, крупнозернистый песок), расположенных над постоянными горизонтами грунтовых вод, во влажное время года образуются временные горизонты висячих грунтовых вод, над которыми создается капиллярная кайма (рис. 1, справа). В сухое время года горизонты висячих грунтовых вод исчезают. Постоянные горизонты капиллярно-подвешенных вод иногда локализуются над участками, в которых образуются временные горизонты висячих грунтовых вод.

Уровень вод висячего горизонта находится значительно выше расположенного под ним уровня вод постоянного горизонта. Эта ситуация соответствует случаю, когда в одной камере расположены две капиллярные системы с различными пьезометрическими уровнями.

Из сказанного видно, что горизонты висячих грунтовых вод не могут находиться в равновесии с окружающей средой и с расположенными гипсометрически ниже постоянными горизонтами грунтовых вод, поскольку кривизна менисков не соответствует условиям равновесия, и в замкнутой среде должно происходить выравнивание пьезометрических уровней, ведущее к перетеканию воды вниз.

КАПИЛЛЯРНОЕ СИФОНИРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ ГАЗООБРАЗНУЮ СРЕДУ

Хорошо известное в механике грунтов капиллярное сифонирование через мелкозернистые грунты представляет собой своеобразный случай капиллярно-подвешенных вод, в котором вода находится в состоянии движения. На рис. 2 показан разрез через борт водохранилища, расположенного слева. Здесь 1—коренные плотные, практически водонепроницаемые породы и 2—пласт галечника, залегающего на дне водохранилища. Пласт 3 на чертеже оставлен незаштрихованным. Выше расположен пласт 4—средний суглинок, прикрытый пластом тяжелой глины 5 (Тер-Степанян, 1953).

Если допустить, что пласт 3 является таким же средним суглинком, как и расположенный над ним пласт 4, то может иметь место капиллярное сифонирование через мелкозернистый грунт. В этом случае возможно поднятие воды по пласту 3+4 на высоту капиллярного поднятия h_c , перелив ее через гребень водоупора и переход на противоположную чаше водохранилища сторону склона. Здесь пласт суглинка 3+4 играет роль подземного сифона.

Однако, возможен и другой случай фильтрации из водохранилища. Предположим, что незаштрихованный на рисунке пласт 3 является таким же крупнообломочным галечником, как и расположенный ниже него пласт 2. По общепринятому мнению, представленное на рисунке геологическое строение чаши водохранилища исключает возможность фильтрации воды в грунт, так как окружающие чашу водоупорные породы поднимаются выше уровня воды в чаше, а сифонный эффект, в силу отсутствия капиллярного поднятия в галечнике, не может иметь места. Действительно, буровая скважина 7, пробуренная над указанным пластом, обнаруживает вначале сухой галечник и лишь на некоторой глубине—водоносный галечник; уровень G грунтовых вод в галечнике совпадает с горизонтом воды в водохранилище.

Несмотря на это, если пласт достаточно плотной тяжелой глины можно практически рассматривать как водо- и воздухо-непроницаемый слой, то оказывается, что пласт сухого галечника, расположенный над уровнем грунтовых вод, может служить путем для проникновения воды, оставаясь, впрочем, сухим. Если слой тяжелой глины 5, находящаяся над замкнутой камерой 2+3, в которой имеется свое собственное пространство от сообщения с внешней атмосферой, то в этом случае зона 4 может рассматриваться как капиллярная система, находящаяся над замкнутой камерой 2 + 3, в которой имеется свободная поверхность жидкости с уровнем G . Следствием этого является поднятие пьезометрического уровня капиллярной системы 4 с указанным уровнем G . Отсюда вытекает, что условия, в которых находится капиллярная вода, заполняющая поры пласта суглинка 4, ничем не отличаются от условий равновесия воды в рассмотренном ранее случае, когда незаштрихованная область 3 являлась суглинком и когда могло иметь место явление капиллярного сифонирования.

Вследствие этого в пласте суглинка 4 возникает ток воды, как это показано стрелками. Убыль воды в пласте 4 будет восполняться путем испарения ее над поверхностью грунтовых вод, перемещения ее в парообразном состоянии через слой сухого галечника 2+3 к нижней поверхности суглинка 4, конденсации ее на этой поверхности и дальнейшего перемещения по пласту 4 в форме капиллярной воды. В области, расположенной ниже горизонта G , вода не может находиться в равновесии и будет перемещаться вниз под действием гравитационных сил. Она может выйти на поверхность и образовать источник в точке 6. Таким образом, вода источника 6 имеет фильтрационное происхождение. Несмотря на то, что геологические условия района, казалось бы, исключают эту возможность.

Для подсчета количества воды, которое может таким образом утечка из водохранилища, допустим, что пласт проницаемого легкого суглинка мощностью 1 м представляет собой сифон, который поднимается над водоупорными породами, и имеет внизу выход для проникающих через него вод на отметке 50 м ниже уровня воды в водохранилище. Длину фильтрационного пути примем равной 100 м, коэффициент фильтрации суглинка $2 \cdot 10^{-4}$ см/сек. Тогда утечка воды на протяжении 1 км составит в 1 сек. $Q = k_{\text{ит}} F = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 50/100 \cdot 1 \cdot 10000 \times 1000 = 1000 \text{ см}^3/\text{сек}$, или приблизительно 30000 м³/год.

Для борьбы с происходящей описанным путем фильтрацией воды из водохранилища должен быть осуществлен «воздушный дренаж» или вентиляция пласта галечника 3. Для этого должны быть пройдены шурфы через слой тяжелой глины 5 и тем самым обеспечена связь между воздухом, заполняющим пустоты галечника, и внешней атмосферой. Заметим, что действие вентиляции должно быть достаточно сильным, чтобы устранить возможность образования насыщенного пара в пустотах галечника.

Важным следствием фильтрации этого рода из водохранилища может быть образование оползней 8, развивающихся по склону, казалось бы, не имеющему питания грунтовыми водами вследствие отсутствия водоносных горизонтов. Причину образования оползней в таких случаях обычно ищут в действии атмосферных вод, а для борьбы с ними осуществляют сбор и отвод поверхностных вод. Из изложенного видно, что действительная причина оползней в этих случаях—сифонная фильтрация из водохранилища—требует применения совершенно иных сооружений.

ON THE MECHANISM OF SUSPENDED CAPILLARY WATER AND PERCHED GROUNDWATER HORIZONS¹

GEORGE TER-STEPANIAN, Prof., Dr.Tech.Sc.²

Abstract. The behaviour of suspended capillary water and temporary perched groundwater horizons is explained by the properties of capillary systems and the equilibrium conditions of the liquid in them with the surrounding medium. The significance of the curvature of the menisci, and the gravitational potential of piezometric levels in these systems, are stressed. The features of formation and evolution of the suspended capillary water is explained by the theory of capillary systems; this water may be in equilibrium with the external medium. The temporary perched groundwater horizons may not be in equilibrium with the stationary horizons below. A possible type of migration of suspended capillary water is illustrated by capillary siphoning and possibility of landslides due to it is indicated.

Many facts concerning the behaviour of suspended capillary water and temporary perched groundwater horizons are described in literature (Atterberg, 1908; Zunker, 1930; Лебедев, 1936; Terzaghi, 1949; Роде, 1952); certain features of the mechanism of formation of these types of water are attributable to the properties of capillary systems.

EQUILIBRIUM OF CAPILLARY SYSTEM WITH EXTERNAL MEDIUM

Capillary system is a porous solid body having unclosed and rather narrow emptinesses which represent a total combination of communicating capillary passages having arbitrary cross-sections and outlines with a liquid in it, the contact angle of which with the solid substance is less than 90°.

The general condition for isothermal liquid equilibrium in the capillary system is expressed in terms of the mean curvature K_1 and K_2 of the liquid surface at two arbitrary points M_1 and M_2 with elevations z' and z'' above an arbitrary origin (Тер-Степанян, 1951):

$$K_1 = K_2 - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g (z' - z''), \quad (1)$$

where ρ_1 — density of liquid under consideration,
 ρ_2 — density of external medium (air, vapour or other liquid),
 α — surface tension of liquid, and
 g — gravity acceleration.

If M_2 is chosen such that the mean curvature of liquid surface in it is equal to zero, $K_2 = 0$, Eq. (1) reduces to

¹ Revised paper, presented to the Third Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, held in Haifa (Israel), September 1967 and published in Proceedings of the Conference, vol. I, p. 179—181.

² Head, Dept. of Geomechanics, Geological Institute, Armenian Academy of Sciences.

$$K_1 = - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2z} \cdot g(z' - z''), \quad (2)$$

where gz'' is the potential of this point in the gravitational field. Let us assume the zero gravity potential to the point M_2 and indicate by indices below the height of point marked off from it.

Zero mean curvature does not necessarily imply a plane surface of the liquid. It simply means that the radii of principal curvature are equal and of opposite sign. A plane surface is a particular case with both radii equalling infinity. This zero potential characterises a set of points, whose geometric locus determines the piezometric level of the liquid; it may be obtained by means of a piezometer inserted in the capillary system under consideration.

The proportionality factor in Eq. (2) is the inverse of the capillary constant (Poisson's constant) $a^2 = 2z/[(\rho_1 - \rho_2)g]$, hence

$$K_1 = - \frac{z_1}{a^2} \quad (3)$$

i.e. the mean curvature of the liquid surface in any point of the capillary system in gravitational field equals to the ratio of the height of this point, marked off from the piezometric level to the capillary constant of the liquid. The transfer of the moistening boundary onto the outlets or onto the external surface of the capillary system is possible in that part of the system which is located below the piezometric level (Тер-Степанян, 1950). Conditions are favourable when the contact angle is small, which is the case for moist surface and for thin-walled capillary passages. As a result the contact angles of adjoining capillaries overlap, the corresponding menisci merge, and a continuous surface of small curvature is formed; additional pressure generated by the latter should be zero. Hence the piezometric level may not be higher than the lowest point of the system under consideration.

As long as the piezometric level lies above other parts of the system, liquid is discharged and the curvatures of the menisci change accordingly, in turn depressing the piezometric level until it reaches the lowest possible point.

In the case of interaction between a capillary system and an external gaseous medium, a similar process takes place as a result of molecular exchange.

Let the capillary system be in a closed isothermal chamber together with a vessel containing the same liquid (Тер-Степанян, 1952). As the liquid evaporates, the vapour pressure in the chamber increases until equilibrium is established on saturation, corresponding to a vapour pressure p_0 .

Strictly speaking, however, this pressure is only reached by a thin layer of vapour immediately above the free liquid surface in the vessel.

At hydrostatic equilibrium, the vapour pressure p_v at the level z above this surface is:

$$p_v = p_0 - \rho_2 g z. \quad (4)$$

As for the menisci, the saturated vapour pressure on them is augmented by the excess capillary pressure due to their curvature, allowing for the density difference between vapour and liquid:

$$p_m = p_0 + 2\alpha K \frac{\rho_2}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (5)$$

At equilibrium the pressure of saturated vapour above the menisci (Eq. 5) must be equal to the vapour pressure in the surrounding medium (Eq. 4), $p_v = p_m$. Otherwise the liquid will evaporate or condense depending on the sign of the pressure difference. Hence

$$K = - \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\alpha} g z = - \frac{z}{a^2}. \quad (6)$$

Comparing Eqs. (6) and (3) it is seen that equilibrium between the capillary system and the vessel is conditioned on the coincidence of the piezometric level in the former and the free surface in the latter, irrespective of whether or not there is direct communication between them. Moreover, if more than one capillary system is involved, the piezometric levels of all of them would coincide with the free surface. If, on the other hand, the chamber contains only capillary systems, their respective piezometric levels would be adjusted, in accordance with their respective gravitational potentials, to coincide with a common horizontal plane; the mean curvature of the menisci at arbitrary points of all capillary systems would equal the quotient of the elevation of this point (marked off from the common piezometric level) and the capillary constant of the liquid.

EQUILIBRIUM CONDITION OF SUSPENDED CAPILLARY WATER

A valuable contribution to an understanding of mechanism of water, located above the stationary horizons of groundwater was done by Professor K. Terzaghi (1949). He has shown specifically the difference of behaviour of suspended capillary water and temporary horizons of perched groundwater.

The above considerations permit analysis of the equilibrium of suspended capillary water and of the underlying groundwater horizon 1, located over impervious stratum 2; this horizon is the piezometric level of the liquid (Fig. 1, left)³ with the capillary fringe 3 above it.

The height z_1 of the capillary fringe may be determined using the known expression for the capillary head and refining it in respect of the contact angle θ_H :

$$z_1 = \frac{a^2 \cos \theta_H}{r_1},$$

where r_1 is the average radius of soil pores.

As the capillary fringe is fed from below, the contact angle θ_H corresponds to water movement toward the dry surface. The capillary saturation in this case is not complete and only a part of capillary fringe has the maximum degree of saturation (Lambe and Whitman, 1968).

Zone 4 of suspended capillary water is bounded by levels z_2 and z_3 above the piezometric level with corresponding mean curvatures $K_2 = -z_2/a^2$ and $K_3 = -z_3/a^2$.

Zone 5 (between the suspended capillary water and the fringe) may contain semi-continuous capillary water, occupying only the narrowest channels. The upper zone 6 is periodically saturated after a wet spell and contains semi-continuous water after a dry spell. The discharge of water is caused by evaporation from the surface of the upper menisci, consumption by roots, etc.

As the suspended capillary water is fed from above, the contact angle of the upper menisci is determined by the backward movement of the water from the wet surface, and that of the lower menisci—by its movement toward the dry surface. Water retention is governed by the lifting-capacity differential of the menisci forming the upper and the lower boundaries of the wetted zone, determined in turn by their mean curvature.

It follows from the above-said that the suspended capillary water may be in equilibrium with the surrounding medium and with the stationary horizon of groundwater below, since it is retained in soil due to the hysteresis of wetting and the curvature of the menisci corresponds to the equilibrium conditions.

Let us determine the limiting thickness of the suspended capillary water zone. The lifting force P_3 on the horizontal cross-section F , which bounds the suspended capillary water zone from above is $P_3 = z_3 F \rho g$, where z_3 —the height of capillary rise, corresponding to the given shape of upper menisci. If we assume the capillary system as a bundle of vertical tubes with radius r , then

$$z_3 = \frac{a^2 \cos \theta_0}{r}, \quad (8)$$

where θ_0 —contact angle which corresponds to the backward movement of water from the wetted surface; this force is directed upward.

On the same cross-section F the drawing down force P_2 of the menisci, which bound the suspended capillary water zone from below is $P_2 = z_2 F \rho g$, where z_2 the height of capillary rise, corresponding to the shape of the lower menisci; analogically

$$z_2 = \frac{a^2 \cos \theta_H}{r}, \quad (9)$$

where θ_H —contact angle for the movement of water toward the dry surface; this force is directed downward.

The weight P_1 of the water column with cross-section F and height h located between the boundaries of suspended capillary water zone is $P_1 = hF\rho g$. It is retained due to the difference of the mentioned forces, $P_1 = P_2 - P_3$. Using Eqs. (8) and (9), we get the critical height of suspended capillary water $h = z_3 - z_2$ or

$$h = \frac{a^2(\cos\theta_0 - \cos\theta_H)}{r}. \quad (10)$$

Let us assume for an approximate estimation of the height of the suspended capillary water zone, that the soil pore diameter is 0.002 mm or $r = 0.0001$ cm. Assume values of contact angles as for glass and water: $\theta_0 = 0^\circ$ and $\theta_H = 40^\circ$ (Адам, 1949); capillary constant of water $a^2 = 0.15$ cm². Substituting into Eq. (10), we have

$$h = \frac{0.15(1 - 0.76)}{0.0001} = 3.6 \text{ metres.}$$

When the quantity of water in the soil exceeds a certain limit, e.g. by excess infiltration from above, the suspended water outweighs the above difference of lifting forces; its equilibrium is upset and downflow sets in.

In medium-grained soils (particles approximately between 0.05 and 1 mm), this downflow is rapid with most of the suspended water discharged in the form of discrete tongues and only the contact-surface water is retained by the soil. This downflow proceeds fairly easy and therefore no horizons of suspended capillary water is formed practically in the medium-grained soils.

In fine-grained soils, by contrast, the downflow is slow due to their low permeability. Owing to the weight of the suspended water, the lower menisci become less concave and the pressure equilibrium between the saturated vapour over their surface and the adjoining medium is upset, so that the downflow is accompanied by evaporation from the lower menisci and condensation on the groundwater table; their contribution increases with the fineness of soil. This process continues until equilibrium is re-established.

Thus the groundwater horizon may be fed from atmospheric sources unrelated hydraulically to the seeping water.

INTERACTION OF PERCHED AND STATIONARY HORIZONS OF GROUNDWATER

Temporary perched groundwater tables form in lenses 7 located above the stationary groundwater horizons and composed of coarse pervious material (gravel, coarse-grained sand) after a wet spell. These tables, overlain by a capillary fringe (Fig. 1, right), disappear after a dry spell. Permanent horizons of suspended capillary water are sometimes located above the place of origin of the temporary tables. The piezometric level of perched groundwater lies within the vertical boundaries of the lens; it is much higher than that of the stationary groundwater horizon further

beddown. This situation corresponds to the case of two capillary systems with different piezometric levels in a single chamber. Obviously, perched groundwater tables cannot be in equilibrium with stationary groundwater horizons, as adjustment of the piezometric levels necessarily takes place in an isolated medium.

CAPILLARY SIPHONING THROUGH A GASEOUS MEDIUM

Capillary siphoning through fine-grained soils is a particular case of suspended capillary water in motion. A section through the bank of a storage reservoir is shown in Fig. 2, with *I* denoting impervious bedrock, 2 pebble, 4 loam and 5 fat clay.

If layer 3 consists of the same loam as 4, conditions are favourable for capillary siphoning, with water rising through the two layers, and flowing over the bedrock ridge to the other side of the bank. Here the combined layer 3 and 4 is the underground siphon, and *R* indicates the capillary rise.

Alternatively, if layer 3 consists of the same pebble as 2, the siphon effect should apparently be impossible as the impervious bedrock is higher than the water level in the reservoir and no capillary rise takes place in the gravel. In fact, the borehole 7 passes through dry pebble first and only at some depth through water-bearing pebble, and the groundwater horizon, *G*, coincides with the water level in the reservoir. In spite of this if the fat clay layer 5 is assumed watertight and airtight, the combined layer 2 and 3 may provide a path for water penetration while remaining dry. If layer 5 provides insulation from the external atmosphere, layer 4 may be regarded as a capillary system above the closed chamber 2 and 3, with the free water surface at level *G*, and, in these circumstances, the piezometric level of 4 would tend to coincide with *G*. Hence, under both alternatives capillary siphoning may take place. Flow would set in in layer 4 (indicated by arrows), with the water loss compensated by evaporation from the free groundwater surface, and the vapour moving through the dry pebble 3 to the bottom surface of layer 4, condensating there, and flowing on through the layer as capillary water. Below the level *G* the water cannot be in equilibrium and would descend by gravity, possibly surfacing as the spring 6, which would be of seepage origin, although geological considerations seem to exclude this possibility.

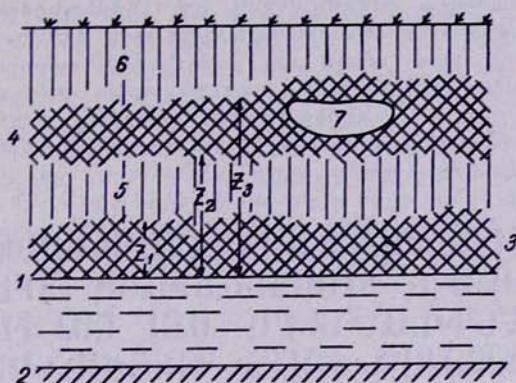
To give an idea of the resulting water loss from the reservoir, let us assume a loam layer (permeability 2×10^{-4} cm/sec) 1 m thick, an outlet 50 m below the water level in the reservoir, and a drainage path 100 m long. The water loss per km would be $Q = 2 \times 10^{-4} \times (50/100) \times 1 \times 100,000 \times 100 = 1,000$ cm³/sec. or approximately 30,000 m³/year. To prevent this leakage, "air drainage" or ventilation of layer 3 should be ensured by means of shafts through layer 5. Ventilation should be suffi-

ciently intensive to prevent accumulation of saturated vapour in pebbled voids.

An important consequence of this type of seepage is the possibility of landslides on slopes apparently unrelated to groundwater movement. Such landslides may be erroneously attributed to the action of atmospheric water, and attempts made to control it by collecting surface runoff. It is clear, however, that the real cause of a landslide in this case would be siphoning from the reservoir, calling for quite different preventive measures.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ—ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

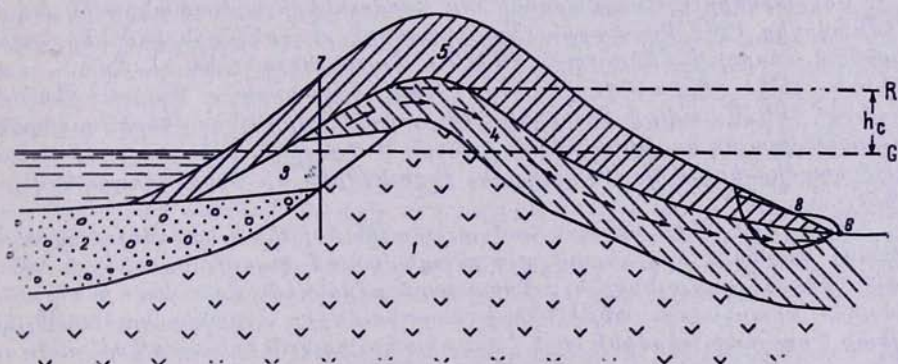
- Адам Н. К., 1947. Физика и химия поверхностей. Москва, Гостехиздат.
- Лебедев А. Ф., 1936. Почвенные и грунтовые воды. Изд. 4-е. Изд. Москва—Ленинград.
- Роде А. А., 1952. Почвенная влага. Москва, Изд. АН СССР.
- Тер-Степанян Г. И., 1950. О глубине капиллярного опирания жидкости. ДАН Арм. ССР, 12(4) : 97—101.
- Тер-Степанян Г. И., 1951. Об условии равновесия жидкости в капиллярной системе. ДАН Арм. ССР, 13 (1) : 3—7.
- Тер-Степанян Г. И., 1952. Об условии равновесия капиллярной системы с внешней средой. Известия АН Арм. ССР, физ.-мат., естеств. и техн. н., 5(3) : 11—15.
- Тер-Степанян Г. И., 1953. Об одном возможном пути фильтрации из водохранилища. ДАН СССР, 91(4) : 923—925.
- Atterberg A., 1908. Studien auf dem Gebiet der Bodenkunde. Landw. Versuchstat. Bd. 69.
- Lambe T. W. and Whitman R. V., 1968. Soil mechanics. New York: Wiley.
- Terzaghi K., 1949 Soil moisture. In „Hydrology“, edited by O. E. Meinzer, New-York: Dover, p. 331—363.
- Zunker F. 1930. Das Verhalten des Bodens zum Wasser. Handbuch der Bodenlehre, von E. Blank, Berlin: Springer, Bd. 6.



նկ. 1. Մագանորային կախված ջրերի (ձախից) և ղետնաջրերի ժամանակավոր կախյալ հորիզոնների (աջից) ձևավորման պայմանները և դրանց փոխազդեցությունը գետնաջրերի հաստատուն հորիզոնի հետ:

Рис. 1. Условия формирования капиллярно-подвешенных вод (слева) и временных висячих горизонтов грунтовых вод (справа) и их взаимоотношение с постоянным горизонтом грунтовых вод.

Fig. 1. Conditions of formation of suspended capillary water (left) and temporary horizons of perched groundwater (right) and their relationship with the stationary horizons of groundwater



նկ. 2. Գազային միջավայրի միջով մագանորային սիֆոնումը կարող է առաջացնել ջրամբարից ձձանցումային կորուստները և հակադարձ լանջի վրա սողանքների զարգացումը:

Рис. 2. Капиллярное сифонирование через газообразную среду может вызвать фильтрационные потери из водохранилища и развитие оползней на противоположном склоне.

Fig. 2. Capillary siphoning through a gaseous medium may cause seepage losses from a storage reservoir and development of landslides on the opposite slope