

ВЛИЯНИЕ МИГРАЦИОННОЙ ВЛАГИ НА ПРОЦЕСС МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТОВ

С. А. КУДРЯВЦЕВ – Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения.

Данная статья посвящена вопросам количественной оценки процессов промерзания, морозного пучения и оттаивания. Приведена методика влияния предзимней и миграционной влаги на морозное пучение грунтов. Выполнен численный эксперимент в сравнении с натурными исследованиями для условий Дальнего Востока. Предложена технология защиты обратной засыпки фундаментов от проникновения в нее влаги.

Сооружения, работающие в условиях глубокого сезонного промерзания, подвергаются сильному климатическому воздействию в период промерзания и оттаивания. Требование СНиП [1] о заложении фундаментов ниже глубины промерзания исходит из предположения, что деформации сооружений могут вызываться промерзанием, пучением и оттаиванием грунта лишь под подошвой фундаментов. Однако опыт строительства показал, что выпучиванию при глубоком промерзании подвергаются многие сооружения, фундаменты которых заложены гораздо ниже слоя сезонного промерзания. Подобное явление объясняется прочным смерзанием слоя грунта сезонного промерзания с боковой поверхностью фундаментов и их поднятием при пучении этого слоя.

Относительные деформации грунта от воздействия сил морозного пучения в общем виде представлены следующей зависимостью [2, 3, 8]:

$$\varepsilon_{\text{пч}} = 0,09(w_{\text{tot}} - w_w) \frac{\rho_d}{\rho_w} + 1,09 \int_0^{t_c} q_{\text{wf}} dt + \varepsilon_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где w_{tot} – суммарная влажность грунта; w_w – влажность незамерзшей воды; ρ_d – плотность сухого грунта; ρ_w – плотность воды; t_c – время охлаждения грунта; q_{wf} – интенсивность потока влаги к фронту промерзания; $\varepsilon_{\text{ср}}$ – отно-

сительные деформации за счет образования морозобойных трещин.

Первая часть формулы показывает величину относительной деформации грунта за счет увеличения его объема при замерзании воды, первоначально находящейся в порах грунта. Вторая часть формулы показывает величину относительной деформации за счет увеличения объема грунта при замерзании воды, мигрирующей в промерзающую толщу грунтов. Третья часть формулы показывает величину относительных деформаций за счет образования морозобойных трещин при промерзании.

В условиях глубокого залегания подземных вод, когда сезоннопромерзающие грунты увлажняются преимущественно за счет атмосферных осадков, для количественной оценки деформаций морозного пучения значение расчетной предзимней влажности определяется по формуле [12]

$$w = w_n \frac{\Omega_{\text{ин}}}{\Omega_{\text{а}}},$$

где w_n – средняя влажность промерзающих грунтов, полученная при изысканиях в летне-осенний период; $\Omega_{\text{е}}$ – расчетное количество осадков, выпавших за некоторый летний период $t_{\text{е}}$ (месяцы), предшествующий моменту проведения изысканий; $\Omega_{\text{ос}}$ – расчетное количество осадков, выпавших в предзимний (до установления среднемесячной отрицательной температуры воздуха) период $t_{\text{ос}}$ (месяцы),

равный по продолжительности периоду t_{oc} . Значения Ω_e и Ω_{oc} определяются по средне-многолетним данным.

Продолжительность периода t_e , (сут), определяется отношением

$$t_e = \frac{d_{fn}}{k} \text{ при } t_e \leq 90,$$

где d_{fn} – нормативная глубина сезонного промерзания грунта; k – коэффициент фильтрации, м/сут.

Ориентировочные значения t_e для отдельных видов глинистых грунтов составляют: для супеси – 0,5...1 мес., для суглинка – 2 мес., для глины – 3 мес.

Количество включений льда и влажность за счет незамерзшей воды в объеме пор мерзлого грунта определяются согласно [1,2]:

$$i = W_{tot} - W_w, \quad (2)$$

$$W_w = K_w W_p, \quad (3)$$

где i – содержание льда в единице объема грунта; W_w – влажность за счет незамерзшей воды; W_{tot} – влажность грунта; W_p – влажность на границе раскатывания; K_w – коэффициент содержания незамерзшей воды в глинистых грунтах.

Проанализировав существующие зависимости коэффициента содержания незамерзшей воды в глинистых грунтах от температуры [1,2,3], мы выбрали аппроксимирующие функции с общим уравнением вида

$$K_w = \frac{a + b \cdot T}{1 + c \cdot T + d \cdot T^2}, \quad (4)$$

где a , b , c , d – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида глинистого грунта; T – температура грунта.

Доверительная вероятность полученной функции находится в интервале от 0,986 до 0,999, а среднее квадратичное отклонение – в пределах 0,0053...0,0328.

Вообще, выше температуры начала замерзания $T_{bf} = 3,2^\circ\text{C}$ [1] вся вода в пределах слоя грунта является талой. Ниже температуры начала замерзания грунта часть воды остается талой. Ее количество уменьшается с понижением температуры. Наконец, ниже некоторой отрицательной температуры прак-

тически мерзлого грунта [2, 3] (обычно $T_f = -3,0...-13,0^\circ\text{C}$) практически вся вода в пределах слоя грунта заморожена.

Когда грунтовая среда полностью заморожена (содержание незамерзшей воды $\approx 0\%$), теплообороты грунта представлены постоянной объемной теплоемкостью мерзлого грунта. Точно так же, когда грунтовая среда полностью оттаяна или разморожена (содержание незамерзшей воды – 100%), теплообороты грунта представлены постоянной объемной теплоемкостью незамерзшего грунта. Однако, когда грунтовая среда подвергается фазовому изменению (содержание незамерзшей воды больше нуля, но меньше 100%), наклон функции содержания незамерзшей воды, объемное содержание воды грунтовой среды и скрытая теплота фазовых переходов в спектре отрицательных температур, поглощенная или отданная грунтом из-за изменений фазы грунтовой воды, должны рассматриваться при определении теплооборотов грунта [4].

Замерзая, вода увеличивается в объеме на 9 %. Обычно она занимает 0,1...0,33% от общего объема грунта, поэтому максимальное пучение должно было бы составлять 0,9...2,7%. Такое пучение характерно для песков, в составе которых преобладают крупные фракции, и не представляет серьезной опасности для большинства сооружений. Пучение пылевато-глинистых грунтов может быть в несколько раз больше указанных значений. Объясняется это миграцией влаги из нижних горизонтов в зону промерзания [6, 7, 8, 9]. До сих пор нет единого мнения даже о причинах или механизме миграции влаги к фронту промерзания. Для объяснения этого явления различными учеными были выдвинуты капиллярная, осмотическая, гидродинамическая, адсорбционная, кристаллизационно-пленочная теории [4, 5, 6, 7, 8].

Зависимость величины интенсивности миграционного потока влаги q_{wf} к фронту промерзания от скорости промерзания v_f для широкого диапазона представлена в работах [5, 8], где показано, что для каждого грунта имеется своя оптимальная скорость промерзания v_f^{opt} , соответствующая максимуму q_{wf} (рис.1).

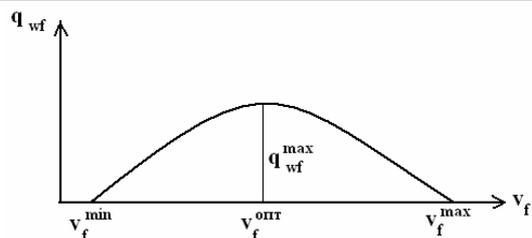


Рис. 1. График зависимости величины миграционного потока воды от скорости промерзания грунта при минимальном расстоянии от уровня подземных вод $Z = 0,1$ м по [8]

С увеличением или уменьшением v_f относительно v_f^{opt} значение q_{wf} уменьшается. Диапазон оптимальной скорости составляет $v_f^{opt} \approx 0,6 \dots 1,0$ мм/ч, ниже минимальной скорости промерзания, равной $v_f^{min} \approx 0,02 \dots 0,04$ мм/ч, процесса миграции нет, а выше максимальной скорости, равной $v_f^{max} \approx 8 \dots 15$ мм/ч пучение также отсутствует [8].

Процесс миграции влаги в общем случае не является установившимся и зависит при прочих одинаковых условиях от степени и периодичности охлаждения грунта. По мере увеличения степени охлаждения может наступить момент, когда скорость промерзания превысит скорость перемещения влаги в буферной зоне и количество воды, фиксируемое у границы промерзания, будет равно начальному влагосодержанию. В результате неравномерного охлаждения в промерзающем грунте может наблюдаться чередование слоев, содержащих только начальную влагу, и слоев, в которых, кроме начальной, будет содержаться также миграционная влага. Предполагая, что грунт промерз на глубину z , выделим в нем по температурному признаку слой z_h , в котором содержание льда, образовавшегося за счет подтока влаги, будет равно всему количеству миграционной влаги в отдельных прослойках. Очевидно, такой слой с установившимся подтоком влаги будет соответствовать зоне пучения при промерзании грунта на глубину z .

Средняя влажность грунта в пределах слоя миграции в зависимости от количества миграционной влаги в зоне определяется по формуле [11]:

$$w_{wf} = \frac{Q_{wf}}{\gamma_d},$$

где Q_{wf} — количество миграционной влаги; γ_d — удельный вес сухого грунта.

Масса миграционной влаги Q_{wf} определяется по формуле

$$Q_{wf} = q_{wf} \cdot A \cdot t,$$

где A — площадь сечения миграционного потока; t — время действия миграционного потока.

Ввиду того, что миграционный поток определяется в единичном объеме, удельный вес сухого грунта γ_d равен массе сухого грунта Q_d . Тогда приращение средней миграционной влажности за интервал времени равно

$$\Delta W_{wf} = \frac{Q_{wf}}{Q_d}.$$

При расчете количества миграционной влаги при промерзании необходимо знать годовой тренд уровня подземных вод (УПВ) и скорость промерзания. На основании многочисленных наблюдений за колебанием грунтовых вод, проводившихся различными организациями на территории России с сезонным промерзанием грунтов, в годовом цикле колебания уровня грунтовых вод наблюдаются два максимума: весенний и осенний. Весенний максимум в большинстве случаев характеризует наивысшее положение уровня в годовом цикле. Осенний максимум несколько меньше весеннего. Наинизшее положение УПВ обычно приурочено к концу зимы. Высота подъема и амплитуда колебания УПВ зависят от глубины его залегания от поверхности земли и от гранулометрического состава грунтов, залегающих над ним.

УПВ понижается в конце осени и в течение всей зимы. Основными причинами являются твердые осадки в виде снега, которые не приводят к пополнению пор грунта водой, и промерзание поверхности. В зависимости от температуры наружного воздуха происходит изменение скорости промерзания грунта основания (рис. 2).

По мере удаления фронта промерзания от УПВ величина миграционного потока уменьшается.

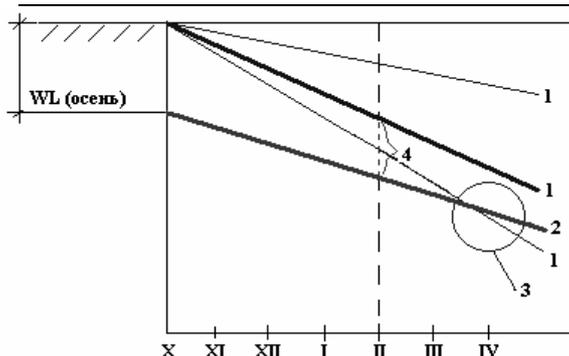


Рис. 2. Графики промерзания и уровня подземных вод в зимний период: 1 – возможные тренды в зависимости от скорости промерзания грунта; 2 – тренд УПВ; 3 – «захлест» фронтом промерзания положения УПВ; 4 – расстояние от фронта промерзания до УПВ

Образование трещин целесообразно учитывать исходя из исследований [13], которые показывают, что кристаллизующаяся в порах вода не заполняет ту часть пор, которая занята воздухом, а раздвигает твердые частицы; за счет этого увеличиваются объем грунта и объем пор, занятых воздухом. Растущие кристаллы льда в промерзающем грунте раздвигают твердые грунтовые частицы и увеличивают объем пор, занятых воздухом. Давление воздуха в порах падает и на границе фронта промерзания. Тонкая зона, где происходит кристаллизация основной массы грунтовой влаги, одновременно является зоной пониженного давления воздуха в порах.

В талом грунте давление воздуха не уменьшается, поэтому вследствие возникшего перепада давлений влага продвигается к фронту промерзания. Скорость ее движения определится скоростью фильтрации под действием возникшего градиента давления.

С учетом полученного в работе [13] результата зависимость относительных деформаций за счет образования морозобойных трещин от влажности при промерзании для глинистых грунтов аппроксимируется уравнением

$$|\varepsilon_{cr}| = \frac{-0,001972516 + 0,0081876987 \cdot w}{1 - 7,732496 \cdot w + 14,969634 \cdot w^2}$$

Доверительная вероятность этого уравнения составляет 0,95, а среднеквадратическое отклонение – 0,14.

Для численного исследования процесса промерзания с учетом миграции влаги был промоделирован полевой эксперимент, выполненный В. И. Федоровым в пос. Заводской Приморского края [10]. Первая очередь промышленных объектов стройиндустрии и жилого массива была закончена в конце 60-х гг. XX в.

В соответствии с данными изысканий (глубокое залегание подземных вод) в проектах не предусматривалась защита подземных сооружений и подвалов от напорных грунтовых вод. Однако после окончания строительства промышленных сооружений первой очереди, жилых домов и объектов социально-культурного комплекса систематически, после ливневых дождей и зимнего оттаивания грунтов обратной засыпки вокруг зданий и сооружений, происходило подтопление различных помещений, полы которых находятся ниже уровня дневной поверхности.

Для установления причин подтопления подземных сооружений и подвалов были выполнены шурфы в направлении, перпендикулярном наружным стенам для определения грунтового профиля до подошвы фундаментов. Был произведен отбор проб грунта по размеченной сетке с последующим определением его влажности и физико-механических характеристик. Расчетная схема у дома №10 и результаты обследования представлены на рис. 3. По материалам инженерно-геологических изысканий, грунты территории однородны и представлены следующими напластованиями: суглинками полутвердыми, маловлажными с показателем текучести $I_L = 0 \dots 0,25$; галькой полуокатанной с суглинком желтого цвета до 40%, плотной, маловлажной.

На момент предпроектных изысканий уровень подземных вод был зафиксирован на глубинах 11...15 м в галечниках, подстилающих суглинки. В момент обследования уровень подземных вод был расположен по кровле галечников.

В работе [10] на разрезе шурфа были нанесены значения влажности грунта, которые свидетельствуют о наличии горизонта подземных вод (верховодки) в обратной засыпке котлована. Вода здесь находится в миграционной связи с подземной водой выше поверх-

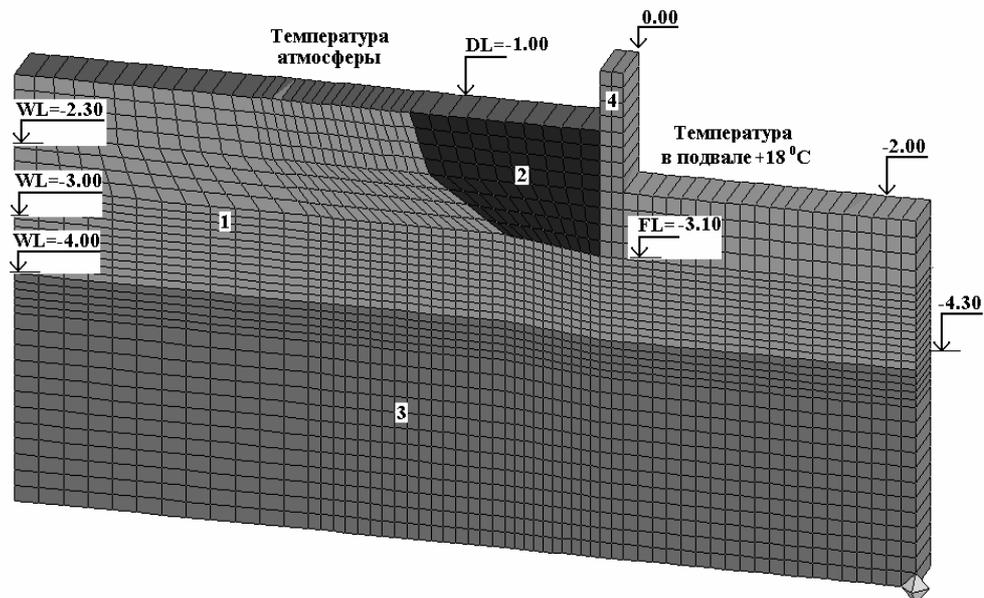


Рис. 3. Расчетная схема: 1 – суглинки полутвердые, маловлажные; 2 – обратная засыпка пазух котлована из суглинка мягкопластичного; 3 – галька полуокатанная с суглинком желтого цвета до 40%, плотная, маловлажная; 4 – фундамент

ности дна котлована, являющегося водоупором. Зафиксированный на момент начала обследования уровень подземных вод находится ниже уровня пола подвала. Грунт обратной засыпки в пазухе над уровнем подземных вод имеет более высокую влажность, чем природный грунт за бортом бывшего котлована. Природный грунт практически сохранил первоначальную природную плотность и влажность, зафиксированную в инженерных изысканиях.

В численном эксперименте был промоделирован процесс промерзания и оттаивания с учетом миграции влаги в зимний период в промерзающие грунты. Рассматривалось три варианта уровня подземных вод (WL=-4,0; WL=-3,0 и WL=-2,0 м от поверхности планировки), которые были зафиксированы в полевом эксперименте В. И. Федорова [10].

Для первого варианта численного расчета (WL=-4,0 м), когда уровень грунтовых вод находится на кровле галечников, распределение влажности на конец марта приведено на рис. 4.

Из рисунков видно, что у фундамента грунт промерзает на глубину до 0,5 м, глубина промерзания возрастает до 2,1 м с удалением от наружных стен здания. Миграция влаги от

горизонта подземных вод в зависимости от скорости промерзания произошла в нижнем углу обратной засыпки с бортом бывшего котлована на глубине 1,0...2,0 м. В количественном отношении прирост влаги при промерзании там составил 2...7%. Увеличение влажности грунтов обратной засыпки за счет миграции при промерзании незначительно.

Осенью при выпадении ливневых дождей уровень подземных вод резко поднимается, поскольку имеется капиллярная связь обратной засыпки в пазухе и поверхности грунта, а также нарушение целостности отмостки. Такое положение было установлено В. И. Федоровым [10] и принято нами для второго варианта численного расчета (WL=-2,3 м), когда уровень грунтовых вод находится на 0,8 м выше подошвы фундамента. Изолинии распределения температуры грунтов и влажности в обратной засыпке фундамента на конец марта по этому варианту приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при УГВ=-2,3 м грунт у фундамента промерзает на глубину до 0,5 м с возрастанием глубины промерзания до 2,0 м с удалением от наружных фундаментных стен здания. Миграция влаги от горизонта подземных вод в зависимости от

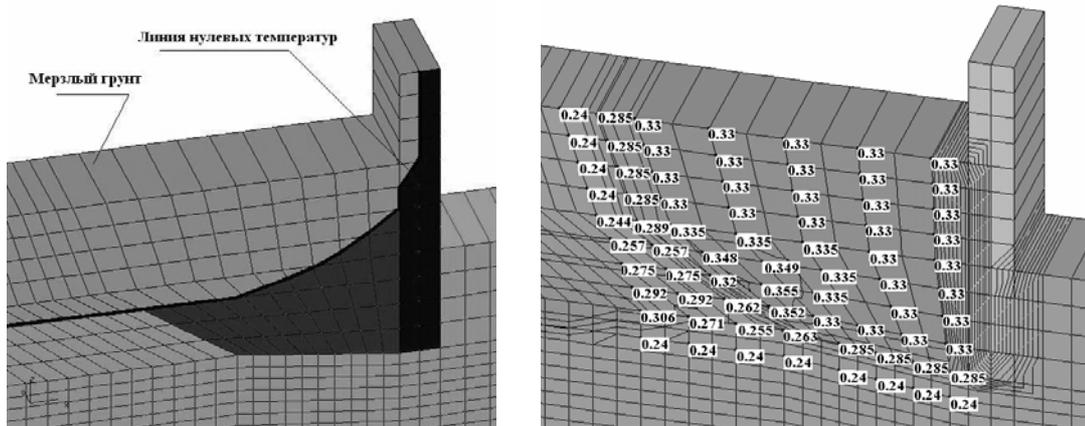


Рис.4. Распределение влажности на март в грунтах обратной засыпки и природном грунте за бортом бывшего котлована при $WL = -4,0$ м

скорости промерзания происходит по всей глубине обратной засыпки и за ее бортом от поверхности планировки, где влажность грунта увеличилась до 20% уже в первый месяц промерзания, и до отметки уровня подземных вод (рис. 6). Наибольший прирост влаги произошел на глубине 0,8...1,0 м от поверхности в мерзлой зоне ближе к бортам обратной засыпки. Результаты данного исследования показывают на значительное увеличение влажности грунтов обратной засыпки за счет миграции воды от УПВ к движущемуся фронту промерзания. Это обстоятельство вызывает значительные деформации и повреждения бетонной отмостки от сил морозного пучения (рис. 8).

Для исключения деформаций бетонной отмостки и, соответственно, проникновения

атмосферных осадков в обратную засыпку пазух фундаментов целесообразно использовать вместо твердой бетонной «мягкую» морозостойкую отмостку. Такая отмостка значительно снизит (а в определенных случаях исключит) действие касательных сил морозного пучения. Современные технологии позволяют создать мягкие, прочные, долговечные, устойчивые к деформациям при отрицательных температурах гидроизолирующие материалы. Технология устройства заключается в укладке тротуарной плитки, брусчатки или декоративного камня на специально подготовленное основание с утеплителем из экструзионного пенополистирола, гидроизоляцией и геотекстилем. В таких случаях необходимо устройство отмостки увязать с решением системы водоотведения вокруг здания.

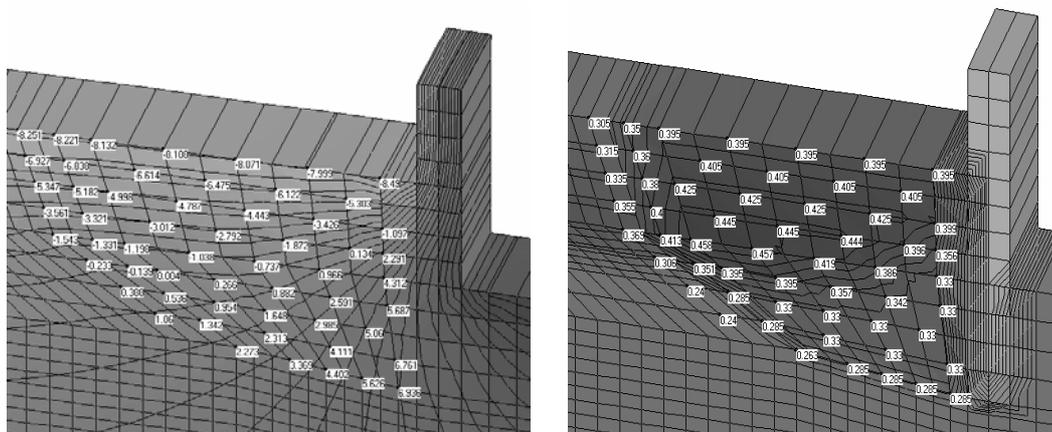


Рис.5. Изолинии распределения температур грунтов и влажности в обратной засыпке фундамента на конец марта при $WL = -2,3$ м

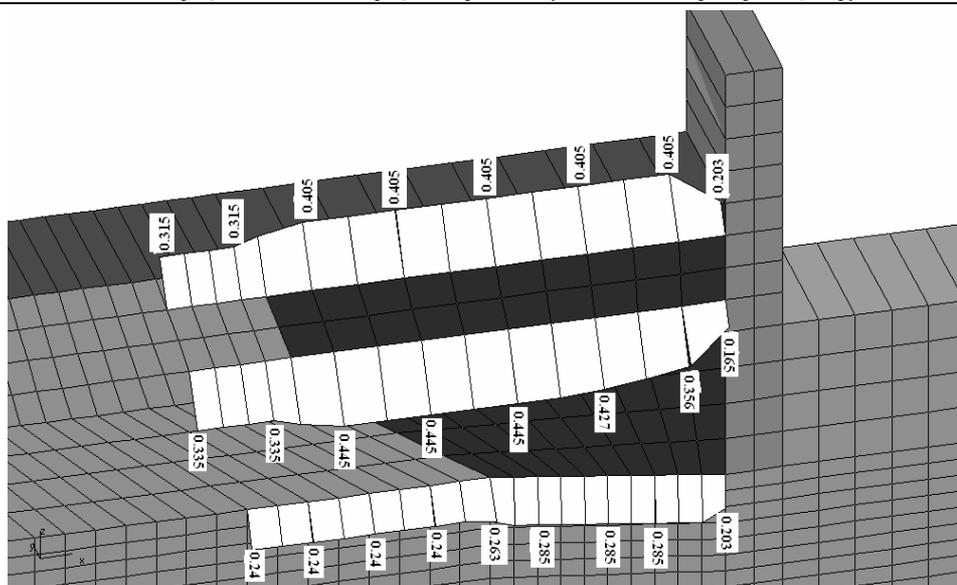


Рис. 6. Эпюры распределения влажности грунта обратной засыпки и за ее бортом в марте на глубине 0,25, 0,75 и 2,0 м от поверхности планировки

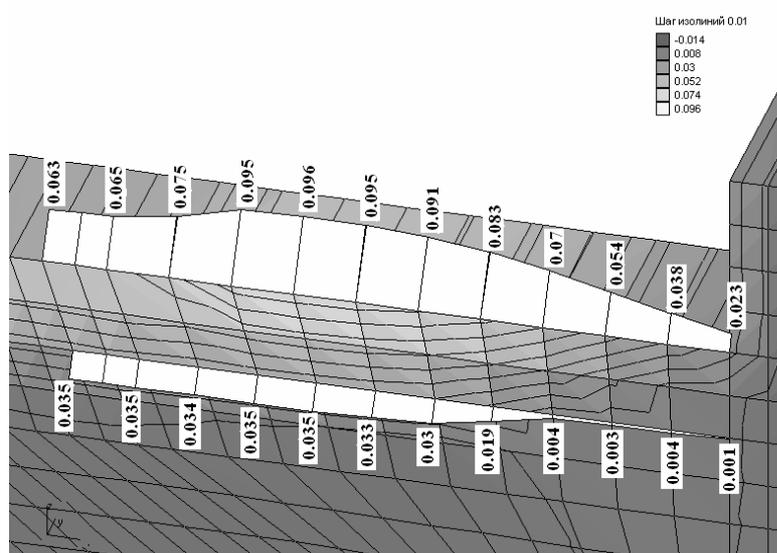


Рис. 7. Эпюры распределения перемещений грунта обратной засыпки и за ее бортом в марте на поверхности планировки и на глубине 0,5 м (м)

Результаты численных расчетов показывают хорошую сходимость полученных распределений влажности и температур промерзания с экспериментальными данными на данной площадке. Деформации морозного пучения в рассматриваемом исследовании не опасны для фундамента здания, так как промерзание у боковой поверхности составляет

на конец зимы не более 0,5 м из-за значительного количества тепла, выделяемого подвальным помещением, что было отмечено в работе [10]. Промерзание и морозное пучение грунтов обратной засыпки при малом УПВ от поверхности планировки вызывают деформации и разрушение жесткой бетонной отмостки вокруг здания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Строительные нормы и правила*. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах/Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 56 с.
2. *Цытович Н. А.* Механика мерзлых грунтов. М.: Высш. школа, 1973. 448 с.
3. *Цытович Н. А., Нерсесова З. А.* Фазовый состав воды в мерзлых грунтах // Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Сб. 3. С. 14–20.
4. *Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А.* Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во МГУ, 1967. 404 с.
5. *Чистотинов Л. В.* Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М.: Наука, 1973. 144 с.
6. *Гречищев С. Е., Чистотинов Л. В., Шур Ю. Л.* Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 384 с.
7. *Ершов Э. Д., Акимов Ю. П., Чеверев В. Г.* и др. Фазовый состав влаги в мерзлых грунтах. М.: Изд-во МГУ, 1979. 188 с.
8. *Фельдман Г. М.* Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
9. *Невзоров А. Л.* Фундаменты на сезонно-промерзающих грунтах: Учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2000. 152 с.
10. *Федоров В. И.* Процессы влагонакопления и морозоопасность грунтов в строительстве / ДальНИИС. Владивосток. 180 с.
11. *Орлов В. О., Дубнов Ю. Д., Меренков Н. Д.* Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Л.: Стройиздат, 1977. 184 с.
12. *Справочник по климату*. Вып. I. Л.: Гидрометеониздат, 1968.
13. *Конюшенко А. Г., Анисимова Л. Г.* Об увеличении объема пор в грунте при замерзании в нем влаги // Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Вып. 43. 1977. С.78–82.