



# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОВЛАГОПЕРЕНОСА В ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТАХ РАЗНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL MOISTURE TRANSFER IN DISPERSE SOILS OF VARIOUS GRAIN-SIZE DISTRIBUTIONS

**КОРОЛЕВ В.А.**

Профессор геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, korolev@geol.msu.ru

**ФЕДЯЕВА Е.А.**

Инженер геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, elena\_fedjaeva@mail.ru

**KOROLEV V.A.**

A professor of the geological faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, korolev@geol.msu.ru

**FEDYAEVA E.A.**

An engineer of the geological faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, elena\_fedjaeva@mail.ru

### Ключевые слова:

термовлагодперенос; термоосмос; гранулометрический состав; песок; супесь; лесс; дисперсный грунт; температурный градиент; фазовый состав.

### Key words:

thermal moisture transfer; thermoosmosis; grain-size distribution; sand; sandy loam; loess; disperse soil; temperature gradient; phase composition.

### Аннотация

Приводятся результаты сравнительного анализа экспериментальных закономерностей термовлагодпереноса в дисперсных песчано-глинистых грунтах различного гранулометрического состава. Анализ выполнен с помощью треугольных диаграмм фазового состава грунтов, позволяющих оценивать термовлагодперенос при любом возможном соотношении фаз в грунтах. Установлено влияние гранулометрического состава и его особенностей на комплекс параметров термовлагодпереноса.

### Введение

Термовлагодперенос — процесс переноса влаги в грунтах под действием температурного градиента ( $\text{grad } T$ ) — осуществляется как в естественных условиях при наличии естественного температурного поля, так и при искусственном тепловом воздействии на грунты. Происходящее при этом перераспределение влаги за счет  $\text{grad } T$  осуществляется от более нагретой области к более холодной и существенно меняет свойства грунтов, в связи с чем прогнозирование этих изменений имеет важное практическое значение.

Особенности термовлагодпереноса в конкретном грунте характеризуются его основными параметрами — коэффициентами влагодпереноса ( $D_H$ ) и термовлагодпереноса ( $D_T$ ). Однако число исследований этих параметров в квазизакрытых системах различных природных грунтов очень ограничено [1, 2, 5–7, 10–15], а многие факторы, влияющие на них, остаются малоизученными. В частности, слабо исследованы закономерности влияния гранулометрического состава грунтов на эти параметры.

Поэтому цель настоящей работы — выявление влияния гранулометрического состава на параметры неизотермического влагодпереноса в различных природных дисперсных грунтах. В работе необходимо бы-

### Abstract

Comparative analysis results of experimental thermal moisture transfer regularities in disperse sandy-clay soils of various grain-size distributions are presented. The analysis is performed using soil phase composition triangular diagrams permitting to assess thermal moisture transfer at any possible proportions of phases in soils. Influence of grain-size distribution and its features on the complex of thermal moisture transfer parameters is ascertained.

Гранулометрический состав исследуемых грунтов, %													
№ образца	Место отбора грунта	Наименование грунта по ГОСТ 25100-95	Фракции										
			галька (щебень)	гравий (дресва)	песок					пыль			
					Размер частиц, мм								
			> 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	< 0,005
1	Островцы	Песок гравелистый	3	11	25	22	22	7	5	1	4	-	-
2	Островцы	Песок крупный	1	2	3	11	41	36	4	1	1	-	-
3	Карелия	Песок крупный	-	1	17	73	9	-	-	-	-	-	-
4	Долина р. Москвы	Песок средней крупности	1	1	1	3	22	49	21	1	1	-	-
5	Балтика	Песок средней крупности	-	-	-	-	7	86	7	-	-	-	-
6	Горки 2-е	Песок мелкий	2	5	2	1	2	20	57	7	4	-	-
7	Островцы	Песок мелкий	-	-	-	-	-	7	84	4	5	-	-
8	Островцы	Песок пылеватый	-	-	-	-	1	2	47	27	23	-	-
9	Алмалык	Суглинок легкий	-	-	-	-	-	-	-	18	44	18	20

ло решить следующие задачи: (1) изучить закономерности термовлагопереноса в песчаных и пылеватых грунтах разной дисперсности; (2) проанализировать влияние гранулометрического состава на параметры термовлагопереноса с помощью треугольных диаграмм фазового состава; (3) оценить влияние на параметры термовлагопереноса разных категорий воды в этих грунтах.

**Объекты и методика исследований**

В качестве объектов исследования были выбраны 8 образцов песков разного гранулометрического состава и пылеватато-глинистый грунт — лесс. При этом анализируемые пески различались по структурным особенностям, гранулометрическому составу, отсортированности и пр. Были выбраны четыре песака разной степени крупности (от гравелистого до пылеватого) из Раменского района Подмосковья (п. Островцы), песок среднезернистый из долины р. Москвы, песок мелкозернистый из Одинцовского района Подмосковья (п. Горки 2-е). Все эти шесть песков имеют аллювиальный генезис. Еще для анализа был выбран песок среднезернистый из отложений пляжа берега Балтийского моря (г. Светлогорск Калининградской обл.). Основным пороодообразующим минералом всех этих песков является кварц, зерна которого имеют хорошую и среднюю окатанность; в образце песка № 1 имеется примесь полевых шпатов. Кроме того, анализировался крупный кварцево-полевошпатовый озерный песок из Карелии. Зерна этого песка слабоокатанны и имеют неправильную форму. В качестве пылеватато-глинистого грунта изучался типичный лесс, отобранный из района г. Алмалыка в долине реки Ахан-Гаран в Узбекистане, который по числу пла-

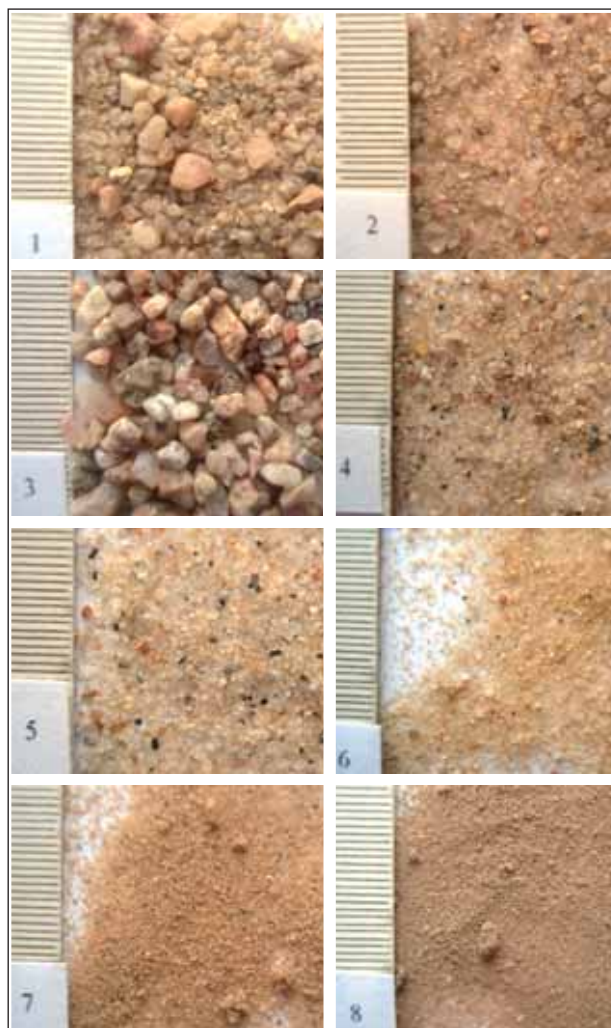


Рис. 1. Внешний вид исследуемых песков. Шкала имеет деление 0,5 мм, цифры соответствуют номерам образцов в табл. 1, 2

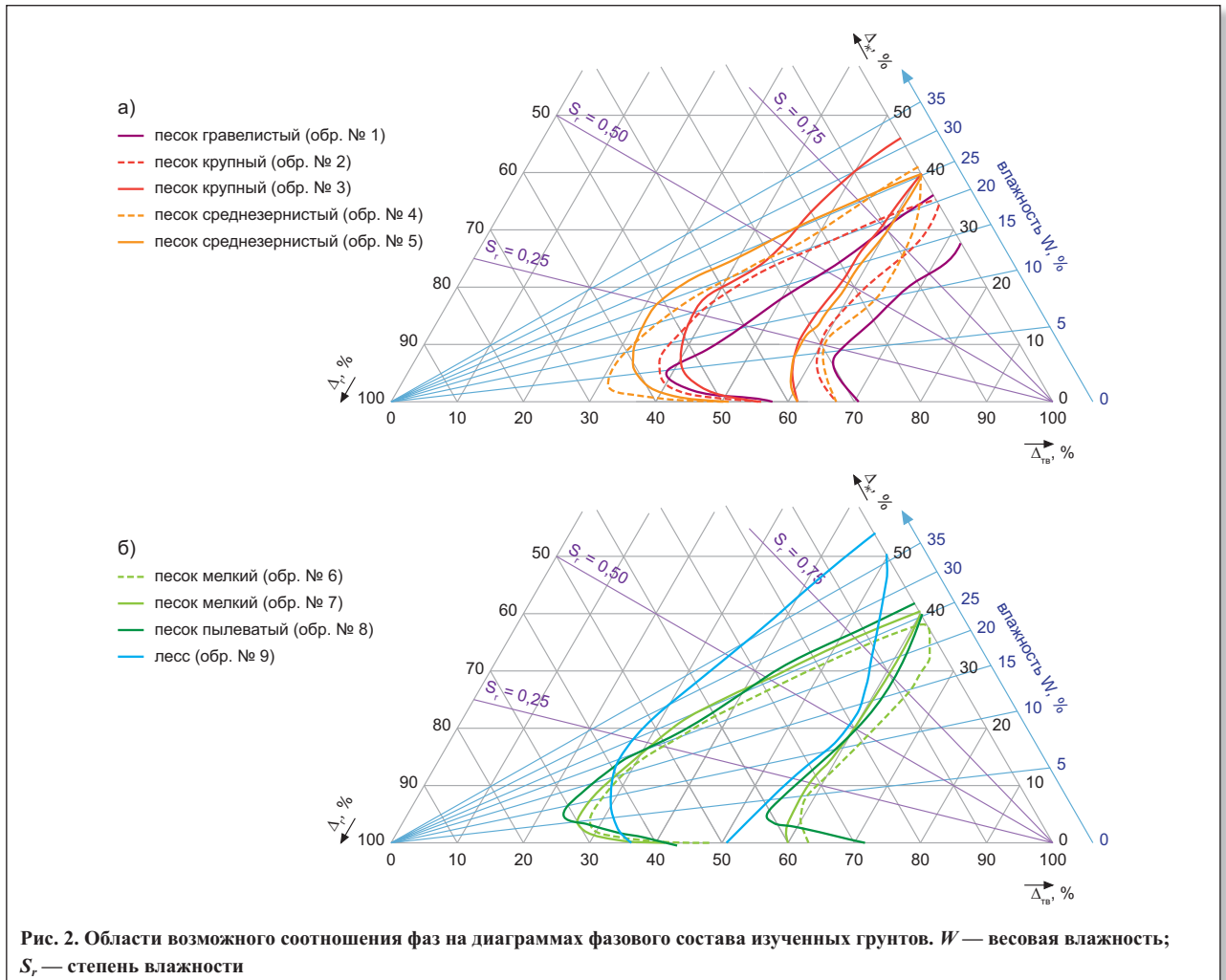


Таблица 2

Физические и физико-химические свойства исследуемых грунтов											
№ образца	Наименование грунта по ГОСТ 25100-95	Коэффициент неоднородности $K_u$	Коэффициент отсортированности $K_{of}$	Природная влажность $W_e, \%$	Гигроскопическая влажность $W_{gs}, \%$	Плотность твердой фазы $\rho_s, \text{г/см}^3$	Плотность с нарушенной структурой, $\text{г/см}^3$		Коэффициент уплотняемости $F$	Коэффициент фильтрации $K_f, \text{м/сут}$	Влажность капиллярной влагоемкости $W_c, \%$
							макс. $\rho_{max}$	мин. $\rho_{min}$			
1	Песок гравелистый	8,0	28,0	11,5	0,7	2,64	1,86	1,59	0,267	8,06	10,5
2	Песок крупный	2,5	5,2	7,1	0,3	2,63	1,76	1,53	0,596	27,65	15,2
3	Песок крупный	1,5	2,4	-	0,2	2,65	1,62	1,47	0,456	207,36	7,7
4	Песок средней крупности	2,8	5,6	-	0,3	2,65	1,79	1,53	0,504	5,76	14,5
5	Песок средней крупности	1,6	2,0	-	0,5	2,65	1,62	1,42	0,388	46,08	22,7
6	Песок мелкий	2,4	20,0	12,5	0,6	2,65	1,65	1,26	0,582	2,82	20,6
7	Песок мелкий	1,7	2,1	25,6	0,7	2,67	1,55	1,25	0,856	3,17	21,5
8	Песок пылеватый	4,3	7,3	23,2	1,4	2,67	1,92	1,21	2,195	0,19	23,5
9	Суглинок легкий			3,5	1,8	2,72	1,35	0,96	0,811	0,01	32,0



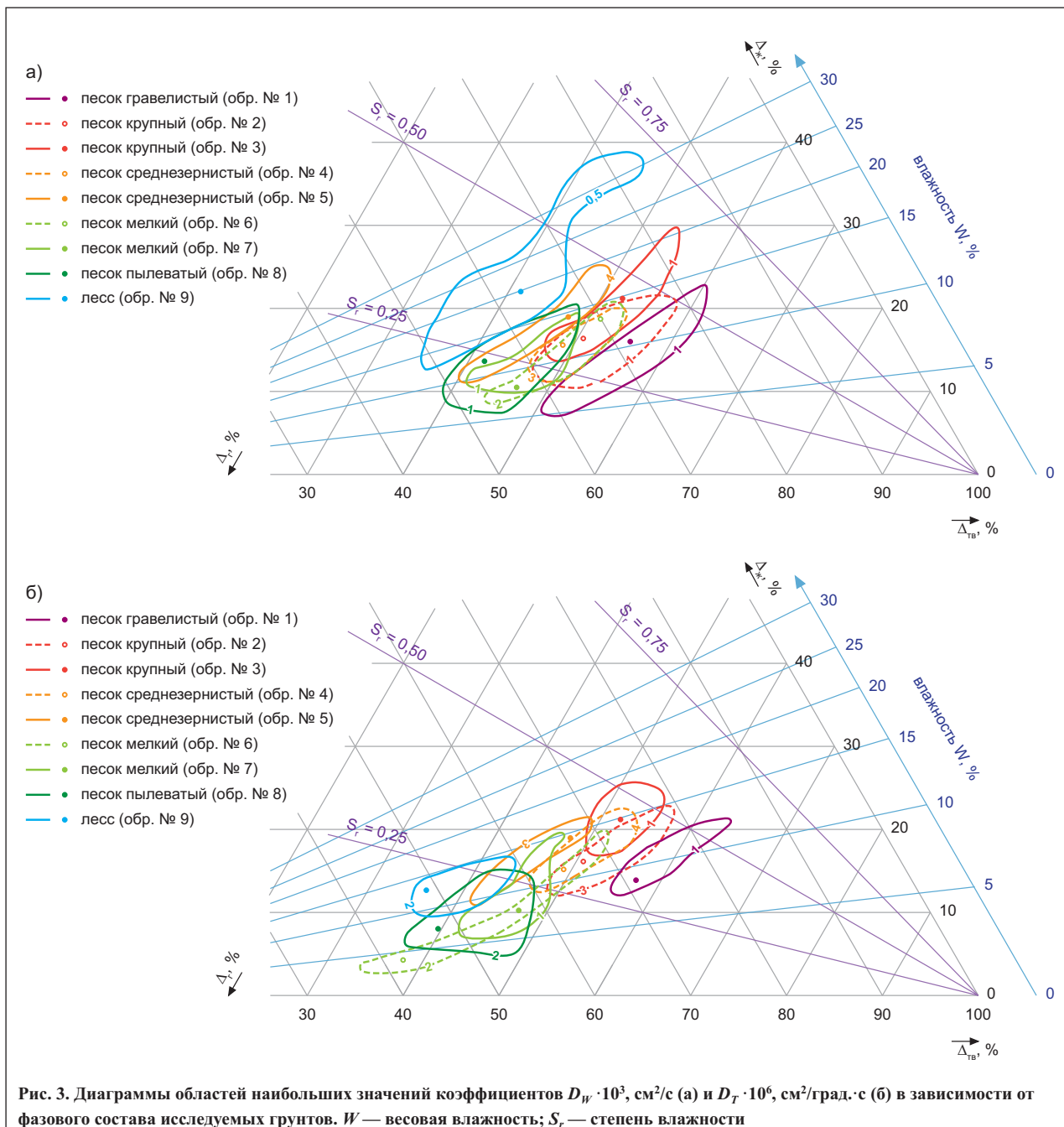
стичности относится к легкому суглинку (имеет показатели верхнего и нижнего пределов пластичности 18,7 и 25,7% соответственно).

Места отбора и гранулометрический состав исследуемых грунтов приведены в табл. 1. Некоторые их свойства представлены в табл. 2. Гранулометрический состав песков определялся ситовым методом по ГОСТ 12536-79, гранулометрический состав лесса — ареометрическим методом по ГОСТ 12536-79. Внешний вид песков показан на рис. 1.

Образцы грунтов изучались в нарушенном сложении, для которого определялись параметры термовлагопереноса по ранее разработанной авторами методике [6, 7, 11, 12]. При этом оценивались следующие характеристики термовлагопереноса: коэффициенты влагопереноса ( $D_W$ ) и термопереноса ( $D_T$ ), скорость перераспределения влаги  $V$ , максимальный поток влаги  $q_{WT}$ , перепад влажности ( $\Delta W$ )<sub>хз</sub> и доля перераспределившейся влаги  $\Sigma_{wT}$ .

Для анализа полученных параметров термовлагопереноса использовалась треугольная диаграмма фазового состава. Разные грунты характеризуются различным возможным количественным содержанием составляющих их твердой, жидкой и газообразной фаз, соотношение между которыми в каждом конкретном грунте может меняться в зависимости от разных условий, плотности сложения, влажности, степени водонасыщения и пр., что наглядно выявляется с помощью таких диаграмм [5].

Каждому из изученных грунтов на фазовых диаграммах соответствует своя специфическая область возможных вариаций соотношения различных фаз грунта (рис. 2). В целом форма таких областей у разных изученных песков схожа, но зависит в основном от их гранулометрического состава. Так, например, для гравелистых песков в единице объема характерно наибольшее относительное содержание твердой фазы и наименьшее жидкой, а для пылеватых песков наоборот — наименьшее





объемное содержание твердой фазы и наибольшее жидкой. Из всех проанализированных авторами песков по форме области возможных вариаций соотношения различных фаз выделяется песок из Карелии (обр. № 3). Для него характерна достаточно узкая и вытянутая форма области существования фаз, что соответствует более узкому диапазону возможных значений плотности его скелета, но достаточно большому диапазону возможных значений влажности.

В силу особенностей строения и свойств лесса область возможного изменения его фазового состава несколько смещена на треугольной диаграмме влево и вверх относительно положения песков (см. рис. 2, б), т.е. лессу по сравнению с песками свойственна меньшая плотность скелета грунта, а свободная вода в нем появляется при значительно большей весовой влажности.

В пределах указанных областей возможного соотношения фаз для всех изученных грунтов в виде изолиний наносились экспериментально определяемые параметры термовлагопереноса, перечисленные выше. Затем проводился их сравнительный анализ.

В грунтах в зависимости от условий могут присутствовать различные категории воды [3]: связанная — адсорбционная, вода переходного состояния (от связанного к свободному), а также капиллярная и свободная. Наличие воды каждой из этих категорий по-разному влияет на параметры термовлагопереноса. Поэтому важными характеристиками грунтов при изучении этого процесса являются характерные показатели влажности, соответствующие этим категориям: максимальная гигроскопическая влажность ( $W_{mg}$ ); влажность капиллярной ( $W_c$ ) и полной ( $W_{sat}$ ) влагоемкости; а у лесса, кроме того, — влажность верхнего ( $W_L$ ) и нижнего ( $W_p$ ) предела пластичности. Эти показатели определялись по обычным методикам [8]. Если значения максимальной гигроскопической влажности для всех исследуемых грунтов довольно близки друг к другу (0,2–0,7% для песков от гравелистого до мелких и 1,4 и 1,8% для песка пылеватого и лесса соответственно) и при отсутствии других категорий воды она мало влияет на процесс термовлагопереноса, то значения капиллярной влажности для разных песков меняются в довольно большом диапазоне: от 7,7% для крупного песка (обр. № 3) до 23,5% для песка пылеватого (обр. № 8). Как показали исследования авторов, именно капиллярная вода играет наиболее существенную роль в процессе неизотермического влагопереноса.

В результате проведенных исследований для каждого исследованного грунта были впервые получены диаграммы фазового состава с нанесенными на них в виде изолиний значениями различных параметров термовлагопереноса. Их сравнительный анализ и позволил сделать ряд важных выводов.

### Результаты и их обсуждение

Сравнительный анализ полученных диаграмм показал, что на параметры термовлагопереноса заметное влияние оказывают гранулометрический состав грунтов и его особенности.

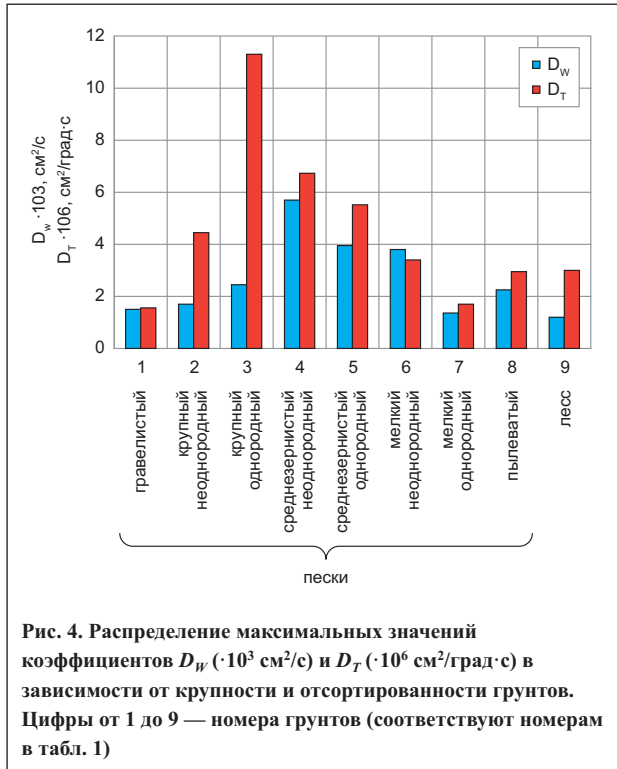
Расположение на фазовых диаграммах значений коэффициентов влагопереноса ( $D_W$ ) и термопереноса

( $D_T$ ) для всех грунтов носит довольно четкий центрально-симметричный характер с максимальными значениями параметров термовлагопереноса в центре области возможного изменения фазового состава грунта, причем наблюдается некоторое соответствие формы изолиний  $D_W$  и  $D_T$  форме этой области (рис. 3). Для того чтобы не перегружать диаграммы, на них были нанесены лишь изолинии с наибольшими значениями соответствующих параметров. Таким образом, различия в расположении на диаграмме зон максимальных значений этих параметров соответствуют различиям в расположении областей возможных вариаций соотношения различных фаз исследуемых грунтов (см. рис. 2, 3). При этом максимальные значения коэффициентов  $D_W$  и  $D_T$  находятся в диапазоне значений степени влажности от 0,15 до 0,50. Максимальные значения коэффициентов  $D_W$  и  $D_T$  соответственно равны: для гравелистого песка (обр. № 1) —  $1,50 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $1,56 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 9\%$ ,  $\rho_d = 1,54$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,346$ ; для крупного песка (обр. № 2) —  $1,70 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $4,45 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 12\%$ ,  $\rho_d = 1,33$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,315$ ; для крупного песка (обр. № 3) —  $2,45 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $11,3 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 15\%$ ,  $\rho_d = 1,39$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,428$ ; для песка средней крупности (обр. № 4) —  $5,70 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $6,73 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 11,75\%$ ,  $\rho_d = 1,30$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,300$ ; для песка средней крупности (обр. № 5) —  $3,95 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $5,5 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 15,3\%$ ,  $\rho_d = 1,25$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,363$ ; для мелкого песка (обр. № 6) —  $3,80 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $3,40 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 14,3\%$ ,  $\rho_d = 1,33$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,381$ ; для мелкого песка (обр. № 7) —  $1,36 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $1,70 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 8,9\%$ ,  $\rho_d = 1,22$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,199$ ; и, наконец, для пылеватого песка (обр. № 8) —  $2,25 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с и  $2,95 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с при  $W = 13\%$ ,  $\rho_d = 1,08$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,236$ .

Расположение значений коэффициента влагопереноса  $D_W$  исследованного лесса носит все тот же центрально-симметричный характер, при этом область максимальных значений находится в диапазоне влажностей от верхнего до нижнего пределов пластичности, что свидетельствует о вкладе в этот процесс осмотической воды наряду с капиллярной. Как известно, в песках осмотическая вода отсутствует, но появляется в пылеватых грунтах, особенно в незасоленных. Наибольшая величина  $D_W$  у лесса ниже, чем у песков:  $D_W = 1,2 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с при  $W = 19,1\%$ ,  $\rho_d = 1,1$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,353$  (см. рис. 3).

Значения коэффициента термопереноса  $D_T$  для изученного лесса в целом также располагаются на треугольной диаграмме центрально-симметрично, однако область наибольших значений  $D_T$  сильно смещена вниз и соответствует значениям влажности, меньшим, чем  $W_p$ . Максимальная величина коэффициента  $D_T$  лесса практически равна таковой для пылеватого песка ( $2,97 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/град.·с) и зафиксирована при  $W = 12,6\%$ ,  $\rho_d = 0,98$  г/см<sup>3</sup>,  $S_r = 0,192$ .

Сравнение значений коэффициента  $D_W$  для разных грунтов (рис. 4) показало, что наиболее благоприятные условия для изотермической влагопроводности за счет диффузии влаги создаются в неотсортированном песке средней крупности (обр. № 4), с повышением и понижением дисперсности коэффициент  $D_W$  уменьшается. Термоперенос влаги за счет всех неизо-



**Рис. 4.** Распределение максимальных значений коэффициентов  $D_w$  ( $\cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$ ) и  $D_T$  ( $\cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{град}\cdot\text{с}$ ) в зависимости от крупности и отсортированности грунтов. Цифры от 1 до 9 — номера грунтов (соответствуют номерам в табл. 1)

термических составляющих наиболее ощутим у крупного отсортированного песка (обр. № 3), состоящего только из частиц крупнее 0,1 мм неправильной угловатой формы (см. рис. 1) и с наиболее простой конфигурацией порового пространства. Очевидно, что в данном случае в процесс термовлагопереноса весьма ощутимый вклад вносит механически захваченная вода, легко передвигающаяся по его широким порам, и преградой для нее могут служить только места контактов частиц друг с другом. У хорошо же отсортированных песков с узкими поровыми каналами (среднезернистого и мелкого) этот параметр заметно меньше, чем у аналогичных по крупности неотсортированных песков. Наименьшие значения коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$  получены для гравелистого и мелкого отсортированного песков. Видимо, это связано с тем, что в дисперсных грунтах термовлагоперенос осуществляется не только в парообразной фазе воды, но и в капиллярно-пленочной, роль которой заметно падает с увеличением размера частиц и при переходе от песчаной фракции к гравийной. Но и сужение поровых каналов создает определенное препятствие на пути мигрирующей влаги, растягивая этот процесс во времени и тем самым снижая значения этих параметров.

Максимальные значения коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$  для крупных песков, песков средней крупности и мелкого (обр. № 6) на диаграмме (см. рис. 3) расположены довольно близко друг к другу, позволяя предположить, что область в диапазонах значений влажности 12–15% и плотности 1,25–1,40 г/см<sup>3</sup> является наиболее благоприятной для процесса термовлагопереноса в подобных грунтах. Для гравелистого песка эта область (как и область возможного изменения фазового состава данного песка) смещена в зону меньшей влажности и большей плотности. Для мелкого песка (обр. № 7) максимальные значения коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$  располагаются в зоне пониженной влажности (возможно, в силу того, что этот песок, однородный по грансоставу,

имеет своеобразную форму порового пространства) и низкой плотности — в силу общей тенденции к понижению плотности с увеличением дисперсности грунта. Этим же объясняется и то обстоятельство, что для пылеватого песка максимальные значения коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$  соответствуют наименьшей плотности скелета грунта.

В целом области, где процесс термовлагопереноса протекает достаточно активно, пересекаются. Однако наблюдается тенденция смещения областей с высокими значениями коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$  в сторону понижения плотности скелета с повышением дисперсности. Это объясняется прежде всего общим характерным смещением областей возможных вариаций соотношения различных фаз исследуемых грунтов (что было отмечено выше). При близком расположении границ этих областей такое смещение можно объяснить тем, что с уменьшением размера частиц поры грунтов сужаются и активное перемещение влаги в поровом пространстве становится возможным только при все более рыхлом сложении грунта.

Из рисунка 3 следует, что процесс термовлагопереноса для исследуемых грунтов наиболее активен при степени влажности от 0,15 (для наиболее дисперсных песков) до 0,50 (для наименее дисперсных). При этом дисперсность и особенности порового пространства грунта сильнее влияют на коэффициент  $D_T$  (т.е. сильнее влияют на парожидкостный перенос под действием  $\text{grad } T$ ), чем на  $D_w$  (т.е. изотермическую теплопроводность, происходящую за счет диффузии влаги). Расположение изолиний  $D_w$  всегда носит четкий центрально-симметричный характер, тогда как для коэффициента  $D_T$  он прослеживается только у достаточно крупных песков, а с увеличением дисперсности наблюдается смещение области наибольших его значений в зону пониженной влажности. В целом же, чем больше в грунте крупных частиц и меньше пылеватых, тем «выше» на диаграмме расположена область с наибольшими значениями коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$  (выше значения  $S_r$ ). А сужение пор за счет увеличения дисперсности ведет к смещению этой области вниз (в зону меньших значений  $S_r$ ) и влево (в зону пониженной плотности скелета грунта), т.к. при больших значениях  $S_r$  эти поры становятся труднопроходимыми для мигрирующего парожидкостного потока влаги. При значениях же влажности, приближающихся к максимальной гигроскопической, движение влаги в тонких пленках, окружающих мелкие частицы, видимо, еще достаточно активно по сравнению с окружающими крупными частицами, что, вероятно, также способствует активизации процесса термовлагопереноса.

Гранулометрический состав и конфигурация порового пространства, а также зависящая от них влажность капиллярной влагоемкости оказывают еще большее влияние на другие параметры термовлагопереноса, меняющиеся во времени по мере перераспределения влаги от нагретой к холодной области образца. В частности, расположение областей значений *скорости перераспределения влаги* ( $V$ ) на момент времени, равный 4 ч от начала опыта, у грунтов со сравнительно невысокой  $W_c$ , не превышающей 15% (капиллярная влага занимает не более половины области возможного изменения фазового состава, при высокой влажности мо-

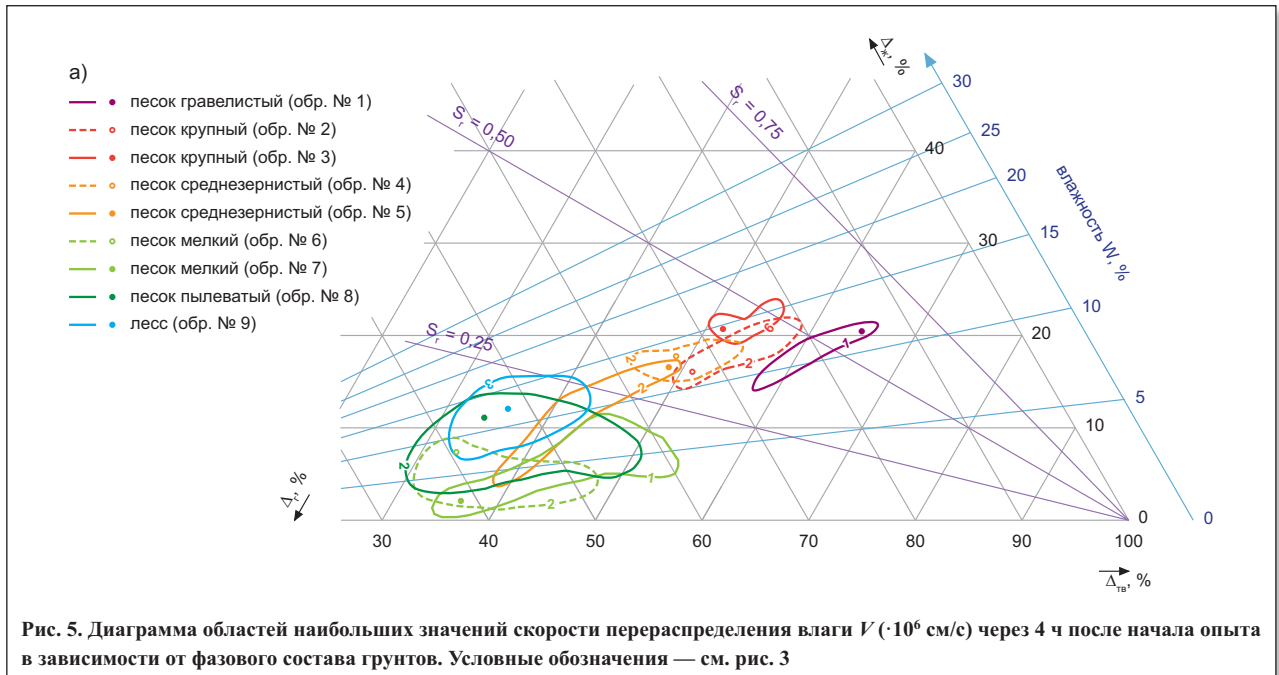


Рис. 5. Диаграмма областей наибольших значений скорости перераспределения влаги  $V \cdot 10^6 \text{ см/с}$  через 4 ч после начала опыта в зависимости от фазового состава грунтов. Условные обозначения — см. рис. 3

жет присутствовать ощутимое количество механически захваченной воды), также носит центрально-симметричный характер (рис. 5). При этом области максимальных значений скорости для всех этих песков (обр. № 1–4) располагаются в зоне  $S_r > 0,25$ , а для гравелистого песка эта зона даже слегка «сдвинута» в зону повышенной влажности.

Совсем другая картина наблюдается для песков с  $W_c > 20\%$  (капиллярная влага занимает почти всю область возможного изменения фазового состава, механически захваченная вода практически отсутствует). Для таких песков характерно смещение областей значений скорости вниз, в зону пониженной влажности ( $S_r < 0,25$ ). Это свойственно мелким и пылеватым пескам. То же прослеживается и для значений скорости для песка средней крупности (обр. № 5), однако, несмотря на явный сдвиг вниз области максимальных значений скорости, центрально-симметричный характер расположения изолиний, свойственный для песков с большим содержанием фракций крупнее 0,1 мм, еще сохраняется и максимальное значение скорости лежит в зоне  $S_r > 0,25$ . Аналогичный сдвиг изолиний наблюдается и у лесса.

Подобную закономерность можно объяснить следующим образом. Величина влажности капиллярной влагоемкости песков возрастает с уменьшением среднего размера пустот — главным образом таких поровых каналов, по которым может мигрировать влага в процессе термовлагопереноса. Сужение поровых каналов ведет к тому, что при  $S_r > 0,25$  уже находящаяся в них вода создает заметное препятствие для миграции влаги под действием  $\text{grad } T$ . Среднезернистый песок (обр. № 5) состоит из достаточно крупных зерен, но в то же время имеет довольно узкие и извилистые поровые проходы. Поэтому и распределение значений скоростей перераспределения влаги внутри области возможного изменения его фазового состава занимает как бы промежуточное положение между песками с высокими и низкими значениями  $W_{\text{кап}}$ .

Максимальные значения скорости перераспределения влаги ( $V$ ) отмечаются у крупного песка (обр. № 3)

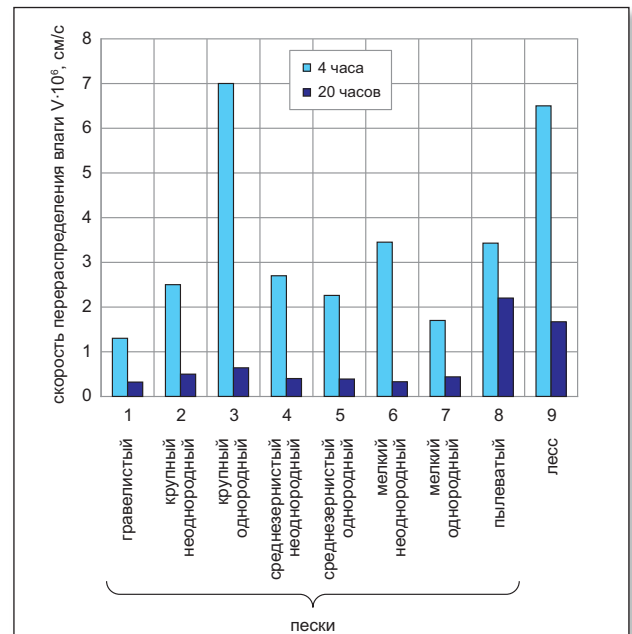


Рис. 6. Распределение максимальных значений скорости перераспределения влаги  $V \cdot 10^6 \text{ см/с}$  в зависимости от крупности и отсортированности грунтов. Цифры от 1 до 9 — номера грунтов (соответствуют номерам в табл. 1)

и лесса (обр. № 9), составляя  $7,00 \cdot 10^{-6}$  и  $6,54 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$  соответственно. Довольно большие скорости свойственны мелкому (обр. № 6) и пылеватому (обр. № 8) пескам ( $3,45 \cdot 10^{-6}$  и  $3,43 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$  соответственно), несколько меньшие — среднезернистому (обр. № 4) и крупному (обр. № 2) ( $2,7 \cdot 10^{-6}$  и  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$ ), еще меньшие — среднезернистому (обр. № 5) и мелкому (обр. № 7) ( $2,26 \cdot 10^{-6}$  и  $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$ ). Минимальные значения  $V$  отмечены для гравелистого песка ( $1,36 \cdot 10^{-6} \text{ см/с}$ ).

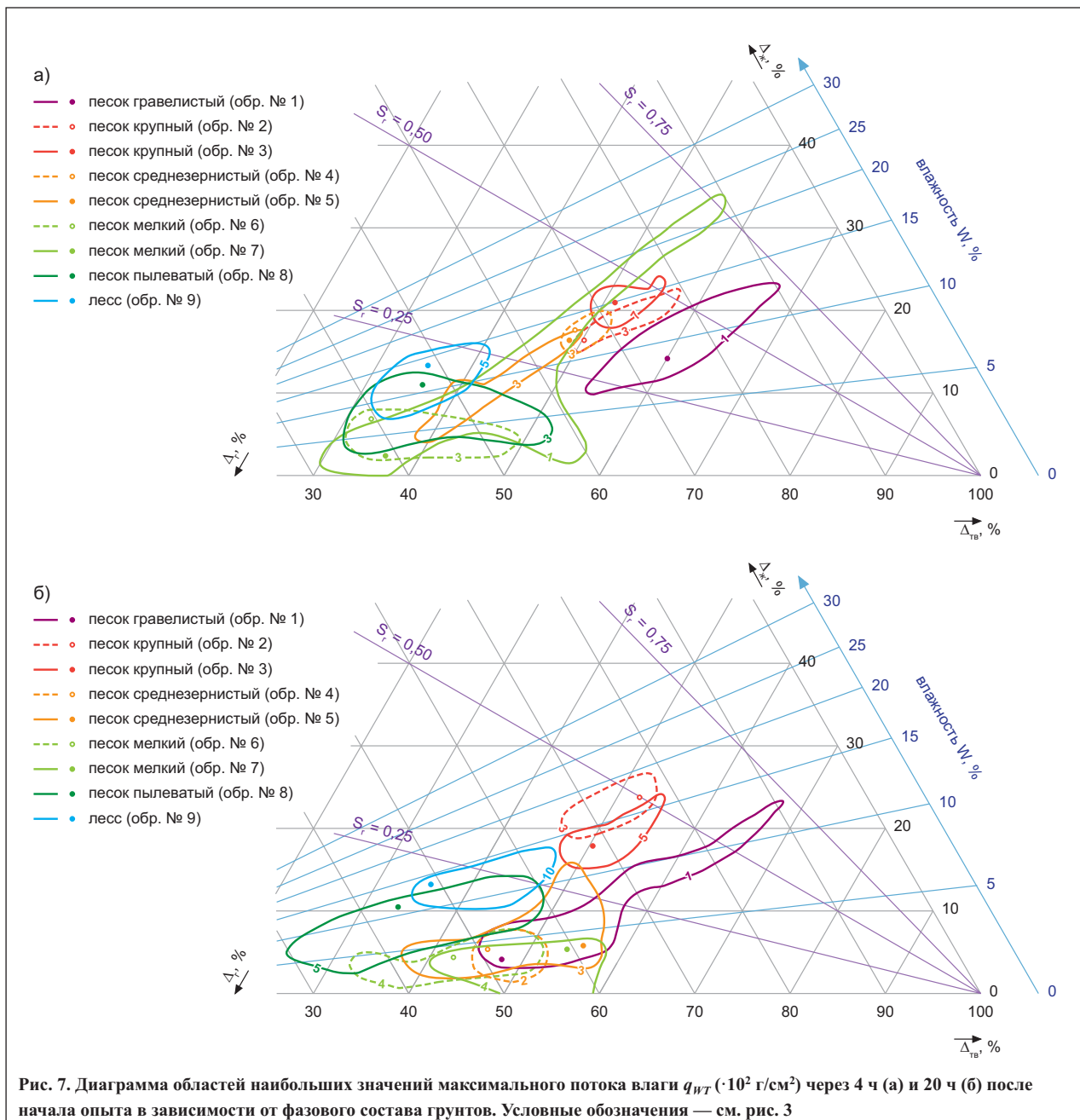
Эти данные свидетельствуют о сложном взаимодействии факторов, влияющих на процесс термовлагопереноса. Если принять во внимание неоднородность грансостава грунтов, то можно отметить следующую закономерность: значения скорости перераспределения влаги ( $V$ ) увеличиваются с увеличением



дисперсности, т.е. от гравелистого песка к лессу (рис. 6). Это опять подтверждает предположение о большом вкладе в процесс термовлагопереноса капиллярно-пленочной воды, роль которой возрастает с уменьшением размера частиц. Однако эта закономерность присуща только неотсортированным и достаточно неоднородным пескам (с коэффициентом неоднородности более 2 и коэффициентом отсортированности более 5) (см. табл. 2).

Однородным и отсортированным пескам ( $K_{н} < 2, K_{оф} < 3$ ) свойственны некоторые индивидуальные особенности, из-за которых эта закономерность частично нарушается. Так, крупный песок (обр. № 3), состоящий только из крупных частиц без пылеватого заполнителя, как уже отмечалось, имеет самую простую форму порового пространства, его поровые каналы наименее извилисты, и для него в процессе термовлагопереноса значительную роль, видимо, играет механически захваченная вода. Все это ускоряет процесс миграции влаги в нем, о чем свидетельствуют максимальные значения

скорости перераспределения влаги ( $V$ ). У песков № 5 и 7, напротив, эти значения ниже, чем у одноименных песков № 4 и 6. Причем если разница между этими параметрами у № 4 и 5 невелика, то у № 6 и 7 они различаются в 2 раза. Причиной этого может быть их различная отсортированность: коэффициенты  $K_{оф}$  первых двух песков различаются меньше чем в 3 раза (5,6 и 2,0 соответственно), а последних двух — почти в 10 раз (20,0 и 2,1). Повышение неоднородности грансоства ведет к увеличению неоднородности порового пространства, что, очевидно, ускоряет процесс термовлагопереноса, особенно у мелких песков, вероятно, благодаря вкладу в этот процесс всех возможных механизмов. Но с увеличением крупности песка роли некоторых из этих механизмов ослабевают (например, роль капиллярно-пленочного влагопереноса), вместе с этим меняется и влияние повышения неоднородности, что в случае с крупным песком приводит к обратному эффекту. Таким образом, для однородных по грансоставу песков прослеживается как бы обратная законо-





мерность: значения  $V$  увеличиваются в ряду «мелкий < средний < крупный песок».

Как отмечалось ранее [6, 7, 11, 13], процесс термо-влажнопереноса в песках наиболее активно протекает в первые часы после начала опыта, но со временем замедляется и прекращается при установлении в образце стационарного теплового поля. Как показали эксперименты, это утверждение верно для всех изученных грунтов, однако скорость затухания процесса миграции влаги под действием  $\text{grad } T$  для грунтов разной крупности различна. Об этом свидетельствуют значения  $V$ , полученные через 20 ч после начала опыта: для гравелистого песка (обр. № 1) — до  $0,32 \cdot 10^{-6}$  см/с, для крупных песков (обр. № 2, 3) — до  $0,5 \cdot 10^{-6}$  и  $0,64 \cdot 10^{-6}$  см/с соответственно, для среднезернистых песков (обр. № 4, 5) — до  $0,30 \cdot 10^{-6}$  и  $0,39 \cdot 10^{-6}$  см/с, для мелких песков (обр. № 6, 7) — до  $0,33 \cdot 10^{-6}$  и  $0,44 \cdot 10^{-6}$  см/с, для пылеватого песка — до  $2,2 \cdot 10^{-6}$  см/с, для лесса — до  $1,67 \cdot 10^{-6}$  см/с. То есть через 20 ч после начала опыта скорость протекания этого процесса для различных песков практически уравнивается. Исключение составляют пылеватый песок и лесс, изучаемый процесс в которых затухает крайне медленно.

Со скоростью перераспределения влаги ( $V$ ) тесно связан (линейной зависимостью) **максимальный поток влаги**  $q_{WT}$ , проходящий через среднее сечение колонки за время  $t$  [2, 5–7, 11, 13]. Поэтому общие закономерности расположения значений потока  $q_{WT}$  на треугольной диаграмме и очертания его изолиний аналогичны таковым для  $V$  за первые 4 ч после начала опыта (рис. 7, а). Для значений потока влаги  $q_{WT}$ , прошедшего через среднее сечение колонки за это время, для песков с  $W_c < 15\%$  также характерно центрально-симметричное расположение изолиний  $q_{WT}$  с максимумом в зоне  $S_r > 0,25$ . Для среднезернистого песка (обр. № 5) изолинии имеют тот же характер расположения, но с заметным смещением области максимальных значений  $q_{WT}$  в зону  $S_r < 0,25$ . У мелких и пылеватого песков с высокой влажностью  $W_c$  эти изолинии сильно смещены в зону пониженной влажности. У лесса максимальные значения потока наблюдались при немного большей влажности, чем у пылеватого песка.

Наибольшая величина потока влаги также отмечается у крупного песка № 3 и лесса ( $10,08 \cdot 10^{-2}$  и  $9,4 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup> соответственно), и далее она уменьшается с уменьшением скорости перераспределения влаги: у мелкого (обр. № 6) и пылеватого (обр. № 8) песков — до  $5,33 \cdot 10^{-2}$  и  $4,94 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>, у среднезернистого (обр. № 4) и крупного (обр. № 2) — до  $4,0 \cdot 10^{-2}$  и  $3,6 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>, у среднезернистого (обр. № 5) и мелкого (обр. № 7) — до  $3,25 \cdot 10^{-2}$  и  $2,45 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>, у гравелистого — до  $1,96 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>. Таким образом, закономерности изменения максимальных значений потока влаги в первые 4 ч после начала опыта для неотсортированных и отсортированных песков аналогичны таковым для скорости перераспределения влаги (рис. 8).

Со временем картина расположения значений максимального потока влаги  $q_{WT}$  несколько меняется, причем на этот раз эти изменения не всегда аналогичны таковым для  $V$  (см. рис. 7, б). В данном случае изменения значений  $q_{WT}$  через 20 ч после начала опыта за-

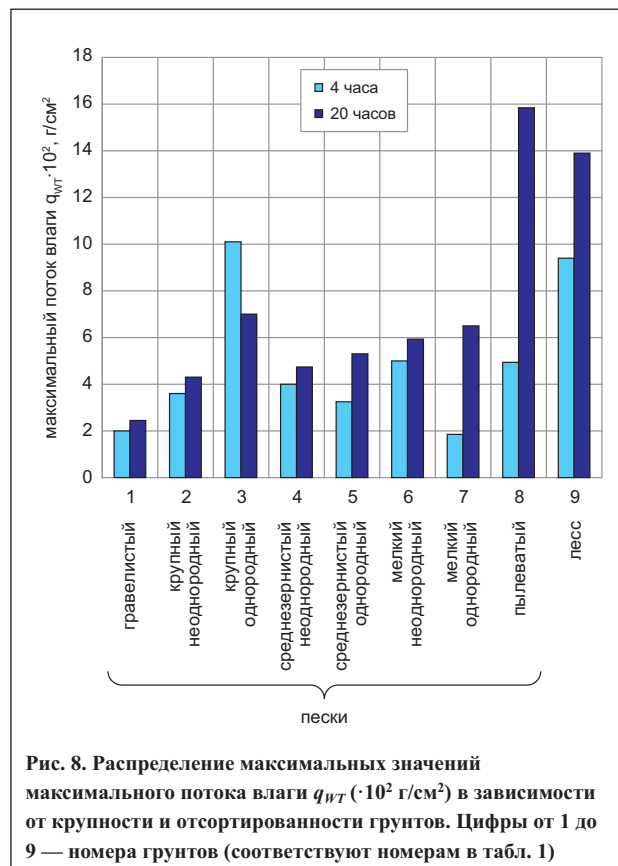


Рис. 8. Распределение максимальных значений максимального потока влаги  $q_{WT}$  ( $\cdot 10^2$  г/см<sup>2</sup>) в зависимости от крупности и отсортированности грунтов. Цифры от 1 до 9 — номера грунтов (соответствуют номерам в табл. 1)

висят не столько от самой скорости перераспределения влаги, сколько от скорости затухания процесса термо-влажнопереноса: быстрое его затухание означает уменьшение со временем величин  $q_{WT}$ ; если же процесс длительный и затухает медленно, то плотность потока со временем возрастает. Это следует из формулы для вычисления  $q_{WT}$  (произведение средней скорости  $V_{cp}$  за время  $t$  на величину  $t$ ). Путем несложных арифметических вычислений получаем условие неизменности величины потока со временем:  $V_4 = 5V_{20}$  (где  $V_4$  и  $V_{20}$  — средние скорости перераспределения влаги за 4 и 20 ч от начала опыта соответственно). Следовательно,  $q_{WT}$  со временем будет уменьшаться при  $V_4 > 5V_{20}$ , а возрастать при  $V_4 < 5V_{20}$ .

Конечно, для каждого конкретного грунта форма изолиний потока на треугольной диаграмме может меняться сложным образом, т.к. в разных зонах области возможного изменения его фазового состава величины скорости перераспределения влаги необязательно меняются одинаково. Однако общая тенденция к уменьшению или увеличению значений  $q_{WT}$  остается неизменной. Для изученных грунтов получены следующие результаты. У крупного песка (обр. № 3) величина максимального потока влаги  $q_{WT}$  уменьшается со временем до  $7,0 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>2</sup>, при этом сохраняется центрально-симметричное расположение изолиний. У среднезернистого песка (обр. № 4) величины  $q_{WT}$  в целом уменьшаются, однако скорости перераспределения влаги внутри области возможного изменения его фазового состава уменьшаются неравномерно. Вследствие этого центрально-симметричный характер расположения изолиний нарушается и на некоторых периферийных участках (при влажности около 19% при наиболее рыхлом и плотном сложениях, а также при  $W < 5\%$  и средней плотности) происходит увеличение

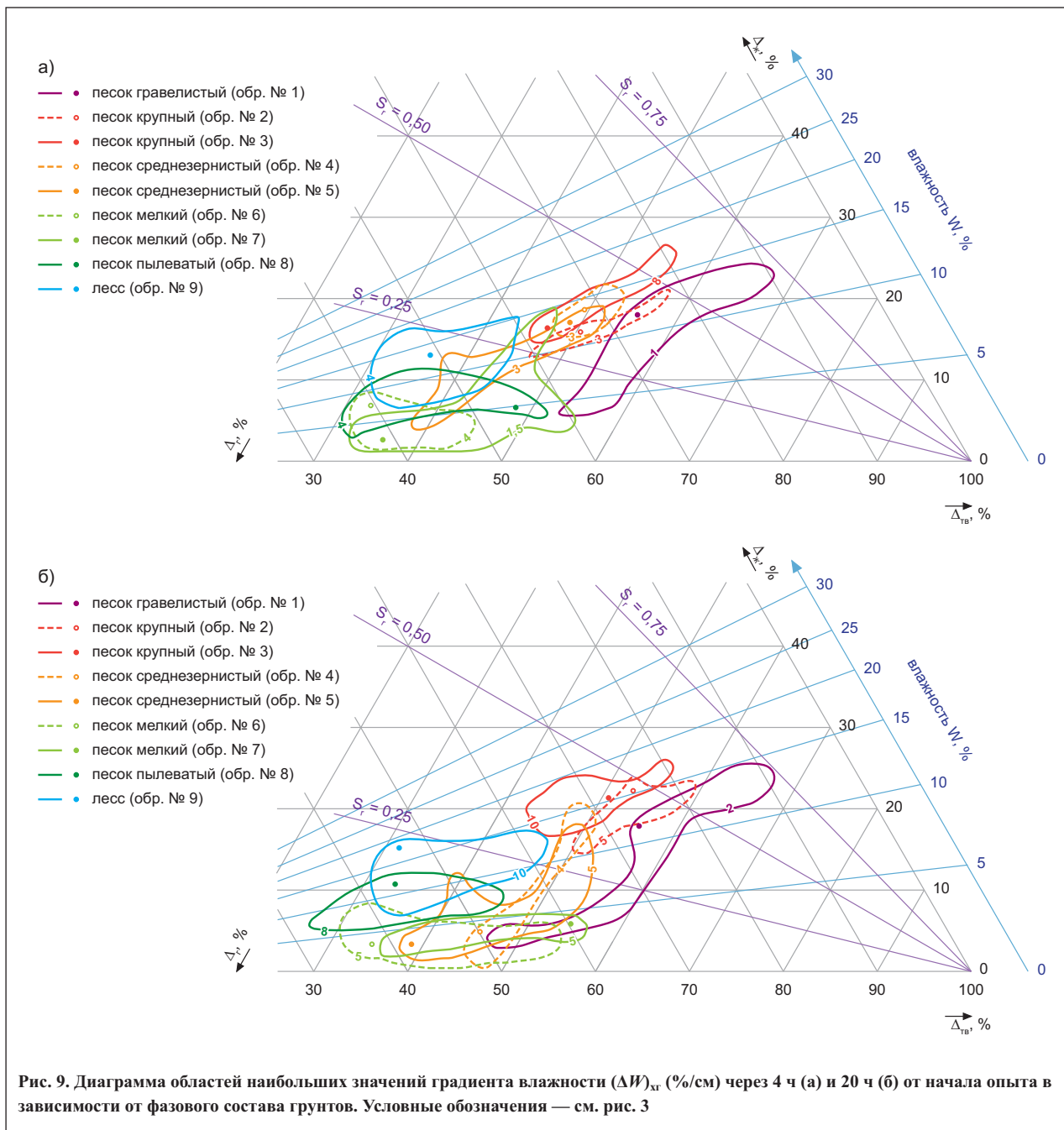


потока максимум до  $4,74 \text{ г/см}^2$ . У крупного песка (обр. № 2) величины  $q_{WT}$ , почти не меняясь, сложно перераспределяются внутри области возможного изменения фазового состава, в результате чего зона максимальных значений  $q_{WT}$  из центра смещается в сторону низких значений плотности скелета грунта, где максимальная величина  $q_{WT}$  составляет  $4,3 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$  (именно в этой зоне изменения скорости перераспределения влаги для данного песка наименее значительны). У среднезернистого песка (обр. № 5) конфигурация изолиний значений  $q_{WT}$  также сильно меняется со смещением области максимальных значений  $q_{WT}$  в зону пониженной влажности и общим увеличением значений  $q_{WT}$  до  $5,3 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$ . Для остальных песков наблюдается повышение величин  $q_{WT}$  с небольшими изменениями формы изолиний  $q_{WT}$  (для гравелистого песка — до  $2,45 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$ , для пылеватого — до  $15,84 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$ , для мелких (обр. № 6 и 7) — до  $5,93 \cdot 10^{-2}$  и  $6,5 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$  соответственно. У лесса

значения потока  $q_{WT}$  увеличиваются до  $13,9 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^2$  без заметного изменения формы изолиний.

Таким образом, через 20 ч после начала опыта максимальные величины  $q_{WT}$  для песков располагаются в следующий ряд: обр. № 1 < обр. № 2 < обр. № 4 < обр. № 5 < обр. № 6 < обр. № 7 < обр. № 8. То есть значения  $q_{WT}$  растут с увеличением дисперсности, причем максимальные величины  $q_{WT}$  у более отсортированных песков всегда больше, чем у неотсортированных (см. рис. 8). Из этой закономерности выбивается только крупный отсортированный песок (обр. № 3), значение  $q_{WT}$  у которого, несмотря на сильное уменьшение со временем, все еще превосходит величины  $q_{WT}$  большинства песков, кроме пылеватого. У лесса значения  $q_{WT}$  несколько меньше, чем у пылеватого песка, но значительно больше, чем у остальных.

Влияние гранулометрического состава и величины влажности капиллярной влагоемкости на диапазон перераспределения влаги, или *перепад влажности*



$(\Delta W)_{xz}$ , также весьма существенно, что наглядно демонстрирует рис. 9. Расположение на треугольных диаграммах значений этого параметра в первые 4 ч после начала опыта аналогично двум вышеописанным (скорости и потоку): центрально-симметричное расположение изолиний  $(\Delta W)_{xz}$  с максимумом в зоне  $S_r > 0,25$  у песков с  $W_{\text{кап}} \leq 15\%$ , смещение этих изолиний в зону  $S_r < 0,25$  у песков с  $W_{\text{кап}} > 20\%$  и «промежуточное» положение изолиний у среднезернистого песка (обр. № 5). Наибольшая максимальная величина  $(\Delta W)_{xz}$  также характерна для крупного песка (обр. № 3) и лесса (9,6 и 8,4 %/см соответственно), а наименьшие — для мелкого (обр. № 7) и гравелистого (обр. № 1) песков (2,3 и 2,6 %/см). Максимальные величины  $(\Delta W)_{xz}$  для остальных песков распределились в следующем ряду: у крупного (обр. № 2) — 3,7 %/см; у среднезернистых (обр. № 4, 5) — 3,9 и 4,0 %/см соответственно; у пылеватого (обр. № 8) — 5,0 %/см; у мелкого (обр. № 6) — 5,5 %/см. Таким образом, можно заметить, что для неотсортированных песков максимальные значения параметра  $(\Delta W)_{xz}$  увеличиваются в целом с увеличением дисперсности грунта (рис. 10). В то же время для отсортированных песков в силу их особого строения наблюдается обратная закономерность.

Очевидно, что со временем разница в значениях влажности между холодным и горячим торцами трубок  $(\Delta W)_{xz}$  увеличивается до достижения некоторой величины, соответствующей стационарному тепловому полю, причем закономерности этого изменения также различны для песков разной крупности (см. рис. 9, б). У гравелистого и крупных песков с увеличением значений  $(\Delta W)_{xz}$  сохраняется центрально-симметричный характер расположения изолиний, а у пылеватого и мелких песков (а также лесса) — характерное смещение «ядра» с максимальными значениями в зону  $S_r < 0,25$ . У обоих же среднезернистых песков наблюдается смещение области максимальных значений в зону пониженной влажности с одновременным изменением ее формы: у неоднородного по грансоставу песка (обр. № 4) эта область распространяется в более широком диапазоне влажности, но в более узком диапазоне плотности скелета грунта, у однородного по грансоставу (обр. № 5) она расширяется и в диапазоне влажности, и в диапазоне плотности.

Максимальные величины  $(\Delta W)_{xz}$  у песков, полученные в ходе экспериментов, в порядке увеличения дисперсности таковы: у гравелистого — 4,7 %/см; у крупных (обр. № 2, 3) — 4,9 и 12,8 %/см соответственно; у среднезернистых (обр. № 4, 5) — 5,0 и 6,34 %/см; у мелких (обр. № 6, 7) — 8,16 и 6,2 %/см; у пылеватого — 11,0 %/см; у лесса — 17,1 %/см. Таким образом, закономерность, отмеченная в первые часы с начала опыта, прослеживается и в конце эксперимента (см. рис. 10). Возможно, это объясняется увеличением числа менисков и пленок воды, которые играют наибольшую роль в передвижении влаги под действием  $\text{grad } T$ . У образцов № 1–4 самые благоприятные условия для этого процесса создаются в центральной части области возможного изменения их фазового состава, где степень заполнения пор водой достаточно велика и при этом трудно добиться большого перепада  $(\Delta W)_{xz}$ .

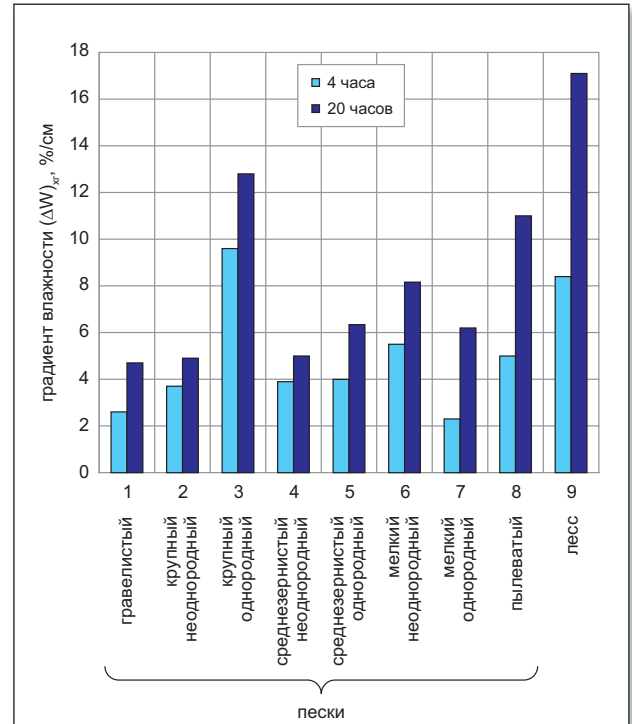


Рис. 10. Распределение максимальных значений градиента влажности  $(\Delta W)_{xz}$  (%/см) в зависимости от крупности и отсортированности грунтов. Цифры от 1 до 9 — номера грунтов (соответствуют номерам в табл. 1)

У гравелистого (обр. № 1), крупного (обр. № 2) и среднезернистого (обр. № 4) песков минимальные значения  $(\Delta W)_{xz}$  наблюдаются при наиболее рыхлом и наиболее плотном сложении, а также при наибольших значениях весовой влажности, близкой к влажности полного насыщения. Для крупного (обр. № 3) и среднезернистого (обр. № 5) песков наименьшие величины  $(\Delta W)_{xz}$  лежат в области наибольших значений их весовой влажности, хотя заметное уменьшение этих величин наблюдается у крупного песка — в зоне пониженной влажности, а у среднезернистого — в зоне пониженной плотности. У мелких и пылеватого песков все максимальные значения  $(\Delta W)_{xz}$ , как уже было сказано, находятся в довольно узкой зоне  $S_r < 0,25$ . С повышением степени влажности эти значения резко уменьшаются, особенно в зонах наиболее рыхлого и наиболее плотного сложения. Минимальные же значения  $(\Delta W)_{xz}$  в лессе наблюдаются при наиболее рыхлом его сложении при  $W \geq W_L$ , при наиболее плотном сложении, а также при наименьших значениях весовой влажности ( $\leq W_{mg}$ ).

Анализ распределения значений и развития во времени доли перераспределившейся влаги  $\Sigma_{wT}$  (рис. 11, а) позволяет установить, что после первых 4 ч от начала опыта распределение значений  $\Sigma_{wT}$  несколько отличается от таковых для ранее описанных параметров. Хотя у песков (обр. № 1–4) наблюдается все то же центрально-симметричное расположение изолиний, оно остается четким только для образца № 3, а у остальных песков заметно явное смещение изолиний к зоне пониженной весовой влажности, которое увеличивается со временем. Зафиксированы следующие максимальные значения  $\Sigma_{wT}$  для этих песков через 4 и 20 ч после начала опыта соответственно: для гравелистого — 1,85 и 10,00%; для крупных —

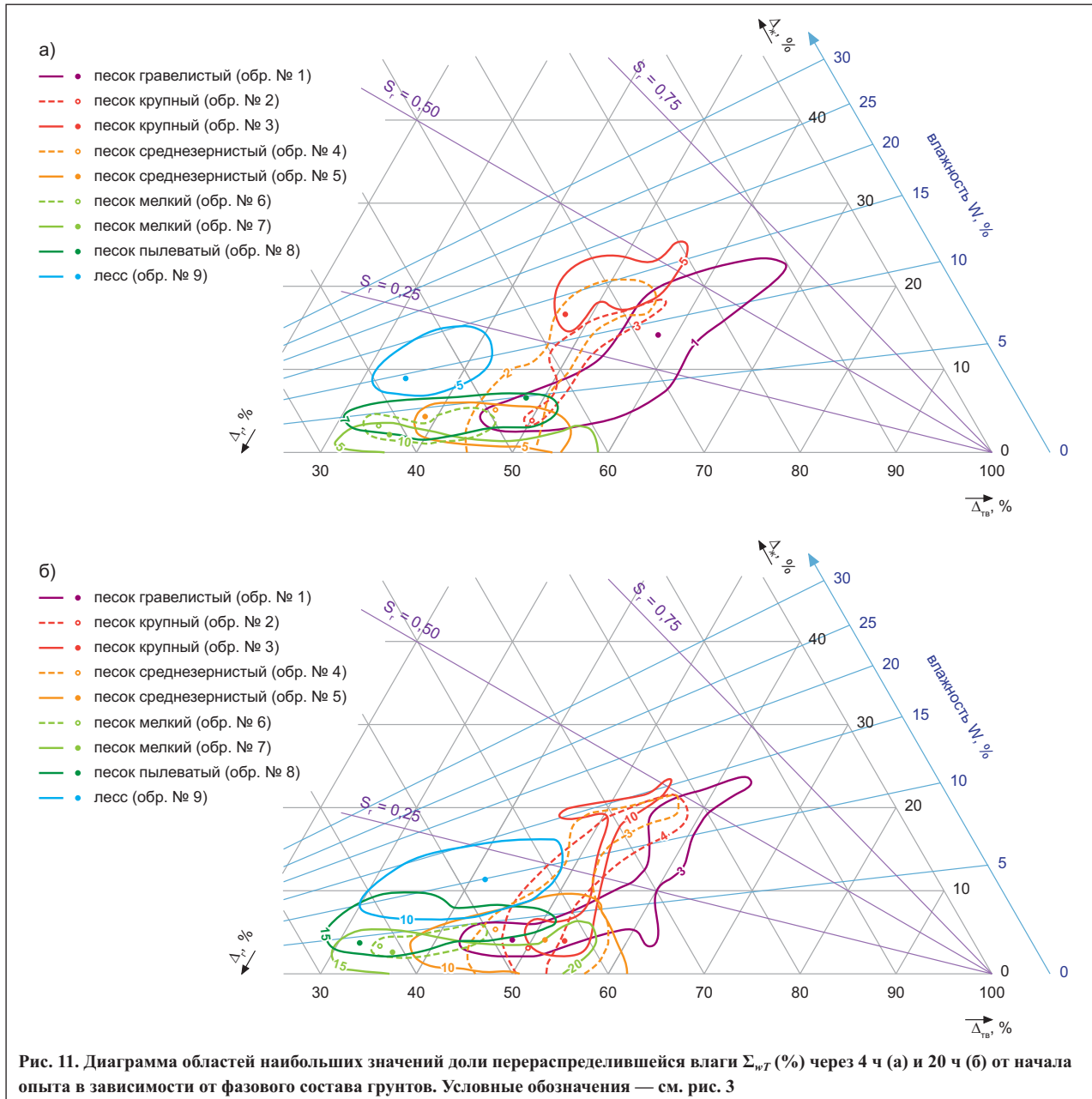


Рис. 11. Диаграмма областей наибольших значений доли перераспределившейся влаги  $\Sigma_{wT}$  (%) через 4 ч (а) и 20 ч (б) от начала опыта в зависимости от фазового состава грунтов. Условные обозначения — см. рис. 3

6,25 и 16,36% у образца № 2, 6,87 и 12,57% у образца № 3; для среднезернистого (обр. № 4) — 5,30 и 16,54%. При этом у крупного песка (обр. № 3) к концу опыта выделяются как бы три зоны максимальных значений  $\Sigma_{wT}$ : 1 — зона наиболее благоприятной для процесса термовлагопереноса в данном грунте влажности ( $\approx 15\%$ ) с довольно широким диапазоном плотности скелета грунта; 2 — зона наиболее благоприятной для процесса термовлагопереноса плотности скелета грунта ( $\approx 1,39 \text{ г/см}^3$ ) с довольно широким диапазоном весовой влажности; 3 — зона с низкой весовой влажностью ( $< 5\%$ ). Те же три зоны, но менее явно прослеживаются у гравелистого и среднезернистого песков.

Для остальных песков, в т.ч. и среднезернистого отсортированного (обр. № 5), максимальные значения  $\Sigma_{wT}$  сосредоточены в зоне наименьших значений весовой влажности (как правило, не более 5%) как в начале, так и в конце опыта и увеличиваются со временем: у среднезернистого (№ 5) — с 8 до 20%, у мелких (№ 6, 7) — с 11,2 до 23,8% и с 6,74 до 20,45% соответственно, у пылеватого (№ 8) — с 8,25 до 21,2%.

Распределение максимальных значений  $\Sigma_{wT}$  на диаграмме (см. рис. 11) показывает, что для различных песков эти величины достигаются при разной плотности скелета грунта. Наиболее плотное сложение требуется для однородных по грансоставу крупного ( $1,40 \text{ г/см}^3$ ) и среднезернистого ( $1,35 \text{ г/см}^3$ ) песков, менее плотное — для неоднородных гравелистого ( $1,27 \text{ г/см}^3$ ), крупного ( $1,29 \text{ г/см}^3$ ) и среднезернистого ( $1,21 \text{ г/см}^3$ ). У мелких песков максимальное значение  $\Sigma_{wT}$  достигается при гораздо более рыхлом сложении ( $0,90\text{--}0,95 \text{ г/см}^3$ ). Пылеватый песок занимает в этом ряду крайнее положение ( $0,85 \text{ г/см}^3$ ). Подобная закономерность прослеживалась и для других параметров термовлагопереноса, описанных выше (например, для коэффициентов  $D_w$  и  $D_T$ ).

Кроме того, обнаруживается четкая закономерность распределения максимальных значений  $\Sigma_{wT}$  через 20 ч с начала опыта в зависимости от крупности и однородности песков (рис. 12). Эти значения повышаются в ряду песков: гравелистый — крупный однородный — крупный неоднородный — среднезернистый неоднородный — среднезернистый однородный.



ный — мелкий однородный — мелкий неоднородный. У пылеватого песка максимальное значение  $\Sigma_{wT}$  несколько ниже, чем у последнего в указанном ряду, но выше, чем у всех остальных. Таким образом, в зоне пониженной влажности у всех песков доля перераспределенной влаги  $\Sigma_{wT}$  со временем повышается в силу особенностей механизма термовлагопереноса [6, 11], причем существует наиболее «подходящий» размер пор, свойственный мелким пескам, для наиболее полного перехода влаги от горячей зоны к холодной. Как уже отмечалось ранее, в процесс влагопереноса основной вклад вносит капиллярная вода, содержание и влияние которой уменьшается с увеличением размера пор, вследствие чего достижение стационарного теплового поля в образце с широкими порами происходит при меньшем перепаде величин влажности между областями с разной температурой, а следовательно, и доля перераспределенной влаги оказывается меньше. Некоторое уменьшение значений  $\Sigma_{wT}$  у пылеватого песка по сравнению с мелким неоднородным можно объяснить тем, что максимальный перепад значений влажности у первого немного меньше и отмечен при большей влажности (хоть и совсем незначительной), чем у второго.

Максимальная величина доли перераспределенной влаги  $\Sigma_{wT}$  в лессе после первых 4 ч термовлагопереноса от начала опыта (7,8%) отмечена при  $W = 9,64\%$  и  $\rho_d = 0,91 \text{ г/см}^3$ ,  $S_r = 0,132$ . Эта величина немного ниже, чем у пылеватого песка, т.к. достигается при большей влажности. Со временем она увеличивается примерно в два раза (максимальная величина 15,75% меньше, чем у пылеватого песка, что также соответствует описанной выше закономерности), но расположение области максимальных значений  $\Sigma_{wT}$  в отличие от песков практически не меняется.

## Выводы

В результате проведенного исследования по изучению влияния гранулометрического состава на параметры термовлагопереноса песчаных и пылеватоглинистых грунтов можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что расположение на фазовых диаграммах значений коэффициента влагопереноса ( $D_W$ ) для всех изученных грунтов разного гранулометрического состава носит четкий центрально-симметричный характер с максимальными значениями этого параметра в центре области возможного изменения их фазового состава. При этом наблюдается некоторое соответствие формы изолиний  $D_W$  форме этой области, чем объясняется «сдвиг» максимальных значений этого параметра в сторону уменьшения плотности сложения от гравелистого песка к пылеватому и далее к лессу. Сравнение значений коэффициента  $D_W$  для разных грунтов показало, что наиболее благоприятные условия для изотермической влагопроводности за счет диффузии влаги создаются в неотсортированном песке средней крупности. С повышением и понижением дисперсности значения коэффициента  $D_W$  снижаются, причем наименее благоприятны для этого лесс и мелкий отсортированный песок.

2. Выявлено, что расположение на фазовых диаграммах значений коэффициента термовлагопереноса ( $D_T$ )

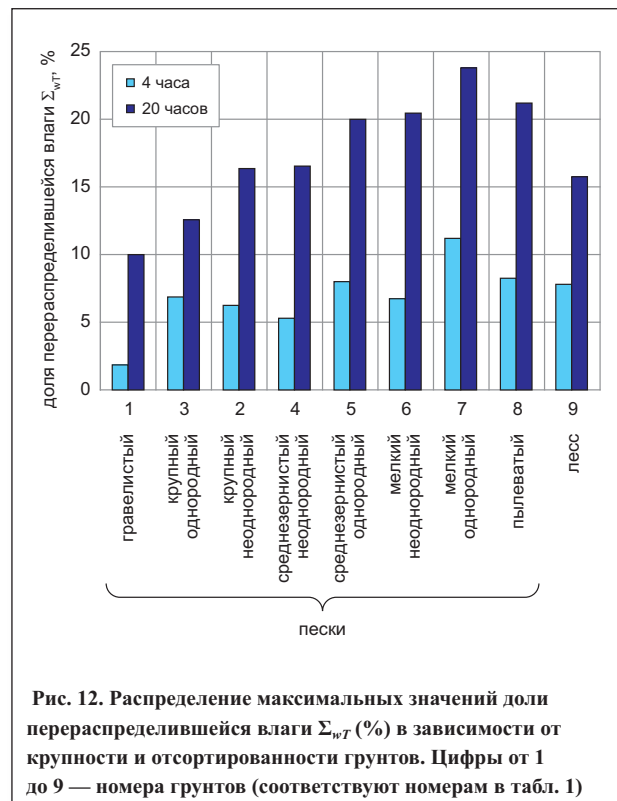


Рис. 12. Распределение максимальных значений доли перераспределенной влаги  $\Sigma_{wT}$  (%) в зависимости от крупности и отсортированности грунтов. Цифры от 1 до 9 — номера грунтов (соответствуют номерам в табл. 1)

для всех изученных грунтов также носит довольно четкий центрально-симметричный характер расположения изолиний. Однако этот параметр более «чувствителен» к изменениям дисперсности и отсортированности, чем коэффициент  $D_W$ . Так, для мелких и пылеватых песков, а также лесса наблюдается некоторый сдвиг «ядра» наибольших значений этого параметра в область меньших значений влажности. Термовлагоперенос за счет всех неизотермических составляющих при этом наиболее ощутим у крупного отсортированного песка с широкими поровыми каналами. У хорошо же отсортированных песков с узкими каналами (среднезернистого и мелкого) этот параметр заметно меньше, чем у аналогичных по крупности неотсортированных песков. Наименьшие значения коэффициента  $D_T$  получены для гравелистого неотсортированного и мелкого отсортированного песков.

3. Впервые установлена зависимость расположения на треугольной диаграмме параметров термовлагопереноса, меняющихся во времени (максимального потока влаги  $q_{wT}$ , скорости перераспределения влаги  $V$ , градиента влажности  $(\Delta W)_{x_2}$  и доли перераспределенной влаги  $\Sigma_{wT}$ ), от дисперсности грунта и значений влажности капиллярной влагоемкости. В целом области максимальных значений этих параметров у песков с  $W_c < 15\%$  (наименее дисперсных) располагаются в зоне  $S_r > 0,25$ , а для песков с  $W_c > 20\%$  (мелких и пылеватых) и лесса характерно смещение областей значений скорости вниз в зону  $S_r < 0,25$ , однако у лесса максимальные величины отмечаются при большей влажности, но меньшей плотности. Среднезернистый отсортированный песок с  $W_c > 20\%$  занимает в этом ряду промежуточное положение.

4. Получена закономерность увеличения значений скорости перераспределения влаги  $V$  и максимального потока влаги  $q_{wT}$  в начале опыта (в первые 4 ч) с




увеличением дисперсности у неоднородных по грансоставу грунтов. У однородных по грансоставу песков установлена обратная закономерность: значения этих параметров увеличиваются в ряду «мелкий — средний — крупный песок».

5. Установлено, что процесс термовлагопереноса во всех грунтах со временем замедляется и через 20 ч от начала опыта скорость протекания этого процесса для различных грунтов практически уравнивается. Медленнее всего этот процесс затухает в пылеватом песке и лессе. Изменения максимальных значений потока влаги  $q_{wT}$  во времени зависят не столько от самой скорости перераспределения влаги, сколько от скорости затухания процесса термовлагопереноса: быстрое его затухание означает уменьшение со временем величин значений потока; если же процесс длительный и затухает медленно, то плотность потока со временем возрастает. В результате обнаруживается такая закономерность: максимальные значения  $q_{wT}$  увеличиваются с ростом дисперсности, причем у более отсортированных песков они всегда больше, чем у неотсортированных. У лесса значения  $q_{wT}$  несколько меньше, чем у пылеватого песка, но значительно больше, чем у остальных песков.

6. Анализ влияния состава и величины капиллярной влагоемкости  $W_c$  на диапазон перераспределения влаги или перепад влажности  $(\Delta W)_{xz}$  показал, что в целом максимальные значения  $(\Delta W)_{xz}$  растут с увеличением дисперсности грунта независимо от времени, прошед-

шего с начала опыта. Для каждого отдельного грунта наблюдается увеличение  $(\Delta W)_{xz}$  со временем.

7. В отличие от прочих параметров (кроме крупного однородного песка) максимальные значения доли перераспределенной влаги  $\Sigma_{wT}$  у песков с  $W_c < 15\%$  смещаются в область пониженной весовой влажности. Установлено, что для этих песков со временем не только увеличиваются значения  $\Sigma_{wT}$ , но и выделяются отдельные зоны, наиболее благоприятные для процесса термовлагопереноса. Обнаружена четкая закономерность распределения максимальных значений  $\Sigma_{wT}$  в зависимости от дисперсности грунта. Эти значения повышаются в ряду песков: гравелистый < крупный однородный < крупный неоднородный < среднезернистый неоднородный < среднезернистый однородный < мелкий однородный < мелкий неоднородный. У пылеватого песка максимальное значение  $\Sigma_{wT}$  несколько ниже, чем у последнего грунта в указанном ряду, но выше, чем у всех остальных. У лесса максимальное значение этого параметра еще ниже и располагается в данном ряду между крупными однородным и неоднородным песками.

8. Подтверждено, что у большинства изученных грунтов основной вклад в процесс термовлагопереноса вносит вода переходного типа (капиллярная у песков и осмотическая у лесса). Однако для грунтов с крупными зернами без пылевой фракции, содержащих слишком мало капиллярной воды, в данный процесс вносит вклад механически захваченная вода. 

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брилинг И.А., Пашковский И.С. Определение параметров влагопереноса в связи с прогнозом водного режима грунтов // Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. М.: Наука, 1982. С. 81–89.
2. Глобус А.М. Физика неизотермического внутрипочвенного влагообмена. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.
3. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др.: под ред. В.Т. Трофимова. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
4. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 159 с.
5. Королев В.А. Термодинамика грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1997. 167 с.
6. Королев В.А., Федяева Е.А. Влияние фазового состава на параметры термовлагопереноса песчаных грунтов // Инженерные изыскания. 2011. № 10. С. 38–46.
7. Королев В.А., Федяева Е.А., Ахромеева Т.Я. Закономерности термовлагопереноса в ненасыщенных дисперсных грунтах // Инженерная геология. 1990. № 3. С. 16–29.
8. Лабораторные работы по грунтоведению / под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
9. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Т. 2. М.: Недра, 1984. 437 с.
10. Федяева Е.А., Королев В.А. Влияние фазового состава на параметры термовлагопереноса песчаных грунтов // Материалы 10-й Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: Изд-во РГГРУ, 2011. Т. 3.
11. Федяева Е.А., Королев В.А. Влияние фазового состава песков на параметры неизотермического влагопереноса // Материалы Ломоносовских чтений, посвященных 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова, г. Москва, 15–17 ноября 2011 г. Секция «Инженерная и экологическая геология». М.: Изд-во МГУ, 2011. URL: <http://geo.web.ru/conf/>.
12. Федяева Е.А., Королев В.А. Исследование влияния фазового состава на параметры термовлагопереноса песчаных грунтов // Материалы 7-й Научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.: Изд-во ПНИИИС, 2011. С. 84–87.
13. Федяева Е.А., Королев В.А. Исследование зависимости параметров термовлагопереноса от фазового состава песчаных грунтов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии Урала и сопредельных территорий». Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2011. С. 41–43.
14. Grifoll J., Gastor J.M., Cohen Y. Non-isothermal soil water transport and evaporation // Advances in Water Resources. 2005. V. 28. P. 1254–1266.
15. Smiles D. et al. (eds.). Heat and mass transfer in the natural environment — a tribute to J.R. Philip / Geophysical Monograph Series. V. 129. Washington, DC: American Geophysical Society, 2002. P. 199–212.