

УДК 551.340

Исследование теплопроводности мерзлого засоленного нефтезагрязненного песка с помощью измерителя ИТС- λ С-10

Э. С. ГРЕЧИЩЕВА, Р. Г. МОТЕНКО

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы*

The results of an experimental study of frozen saline and oil polluted sand thermal conductivity are discussed. The data were obtained by instrument ITS- λ C-10. The influence of salinity and oil pollution on thermal conductivity is analyzed.

Keywords: frozen soil, heat conductivity coefficient, salinization, oil pollution.

Ключевые слова: мерзлые грунты, коэффициент теплопроводности, засоление, нефтяное загрязнение.

Процессы теплообмена, происходящие в талых, мерзлых, промерзающих и протаивающих горных породах, невозможно количественно описать без знания величин теплофизических характеристик грунтов, которые входят в расчетные формулы для нахождения температурного поля, теплоточков и т. д. Теплофизические характеристики используются для теплотехнических расчетов грунтов как оснований инженерно-технических сооружений, и кроме того могут быть использованы для исследования и косвенных оценок изменения состава и строения пород в различных криогенных процессах и явлениях.

Мерзлые дисперсные грунты являются системой, как правило, многофазной и многокомпонентной, и их теплофизические свойства определяются как различиями в свойствах компонентов и их количественным соотношением, так и зависят от их гранулометрического и минерального состава, влажности, плотности, температуры, строения, генезиса, возраста, засоления, загрязнения и пр. Значения теплопроводности компонентов грунта сильно различаются по величине. Теплопроводность большинства породообразующих минералов колеблется от 0,2 до 8 Вт/(м · К). Наличие в грунтах межзернового пространства, заполненного воздухом, водой, льдом, флюидом, соевым раствором и др. резко осложняет процесс переноса тепла. Значения коэффициентов теплопроводности компонентов мерзлого грунта равны: для воздуха 0,024; воды 0,54–0,60; льда 2,22–2,35; нефти 0,11–0,14; соленого раствора 0,52–0,62 Вт/(м · К).

Довольно широко исследованы закономерности изменения теплофизических характеристик дисперсных грунтов различного гранулометрического и минерального состава при изменении таких параметров, как влажность, плотность, температура. Изучено влияние засоления и выявлен сложный характер изменения коэффициента теплопроводности грунтов различного состава от температуры, концентрации порового раствора, вида засоления [1]. Изучено влияние нефтяного загрязнения на свойства мерзлых грунтов, в том числе на теплопроводность [2, 3, 8, 9], и практически отсутствуют данные по исследованию совместного влияния засоления и нефтяного загрязнения на свойства мерзлых грунтов.

Засоление пород неоднозначно влияет на теплопроводные свойства грунтов различного гранулометричес-

кого и минерального состава. В мерзлых песчаных засоленных грунтах появление жидкой фазы воды вызывает довольно резкое снижение теплопроводности по сравнению с теплопроводностью в отсутствие засоления. Так, при изменении засоленности (D_s) от 0 до 1% величина коэффициента теплопроводности мерзлого песка может уменьшаться вдвое. Для засоленных суглинков и глин с разной влажностью (исключая каолинитовую глину) наблюдается следующая зависимость: при малых концентрациях порового раствора (D_s от 0 до 0,5–0,7%) возможно увеличение теплопроводности водонасыщенных глинистых пород на 10–20%, а при дальнейшем росте засоленности происходит ее снижение. В интервале значений $D_s > 1\%$ происходит нивелирование этой зависимости из-за повышения концентрации порового раствора до значений, приближающихся к эвтектическим. В зависимости от типа соли характер изменения теплопроводности от концентрации порового раствора различен [1].

Загрязнение грунтов нефтью может происходить различными путями: при разработке месторождений, при складировании ее на месторождениях и перерабатывающих предприятиях, а также существует опасность утечек во время транспортировки нефти и нефтепродуктов.

Выявлено снижение теплопроводности влагонасыщенных мерзлых пород во всем диапазоне изменения степени загрязнения. В песке, супеси и суглинке снижение происходит почти равномерно при росте загрязнения от 0 до 10%, а в глинах теплопроводность снижается в основном до значения загрязнения 2,5%. Нефтяное загрязнение более существенно изменяет теплопроводность мерзлых дисперсных пород, чем талых. При загрязнении во всех исследуемых породах значения соотношений коэффициентов теплопроводности в мерзлом и талом состоянии увеличиваются при низких значениях влажности и снижаются при больших. Величина снижения соотношений коэффициентов теплопроводности во влагонасыщенных породах увеличивается в ряду песок–супесь–суглинок–глина [2, 3, 8, 9].

При добыче нефти зачастую происходит одновременное загрязнение и засоление грунта. Источниками солей при этом являются пластовые жидкости, сточные промышленные воды, содержащее амбаров и другие геохимически активные вещества, применяемые для извле-

чения и обессоливания нефти. Кроме того, совместное засоление и загрязнение может происходить при излитии нефти в области распространения засоленных грунтов, где проходят пути транспортировки нефти.

Таким образом, влияние засоления на свойства мерзлых грунтов достаточно хорошо изучено, влиянию нефтяного загрязнения на свойства грунта посвящено меньше работ, а данные по исследованию совместного влияния засоления и нефтяного загрязнения практически отсутствуют.

Целью данной работы было исследование совместного влияния нефтяного загрязнения и засоления на теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых грунтов.

Объект и методика исследования

В качестве объекта исследования был выбран модельный грунт — песок, отобранный в карьере г. Люберцы. По классификации ГОСТ 25100–95 песок является мелким однородным и относится к незасоленным. Плотность частиц грунта составляет 2,66 г/см³.

Для проведения искусственного загрязнения в работе была использована: смесь нефтей из нескольких месторождений севера Западной Сибири, поступающая по трубопроводу на Московский нефтеперерабатывающий завод.

Плотность (d_{20}^4) нефти 0,869 г/см³. Температура начала кипения составляет 60 °С. Температура застывания составляет –18 °С. Нефть содержит 39,4% масел, 34,6% асфальтенов и 26% смол. Исследуемую нефть можно отнести к группе смолистых и незасоленных нефтей. Содержание воды в ней — 0,18 мг/л, содержание солей — 8,1 мг/л.

Для всех исследований готовились грунтовые пасты. Чистые образцы увлажнялись дистиллированной водой до значений влажности 9%. Для получения образцов заданной засоленности D_s образцы увлажнялись растворами NaCl различных концентраций, расчет которых производился по формулам СНиП II-18–76, СНиП 2.02.04–88:

$$D_s = (m_z / (m_{\text{ск}} + m_c)) \cdot 100;$$

$$C_{ps} = D_s / (D_s + W_{\text{tot}}),$$

где D_s — засоленность грунта, д. е.; $m_{\text{ск}}$ — масса скелета грунта; m_z — масса содержащихся в грунте солей; C_{ps} — концентрация порового раствора, д. е.; W_{tot} — суммарная влажность грунта, д. е.

Для приготовления загрязненных образцов в увлажненный грунт после тщательного перемешивания добавлялась нефть. Степень загрязнения грунта (z , %) определялась по отношению к массе сухого грунта. Совместно засоленные и загрязненные образцы готовились путем добавления нефти в грунт, предварительно увлажненный раствором до заданных значений засоленности.

В итоге получилось 9 комбинаций значений засоленности и загрязнений. Значения засоленности составили 0; 0,5; 1%; значения нефтяного загрязнения — 0; 2,5; 8%.

В практике теплофизических исследований используется большое количество различных экспериментальных методов. Это объясняется широким разнообразием пород по составу, строению и внешним термобарическим условиям, в которых они находятся. При выборе конкретного

метода необходимо исходить из того, проводится ли определение в полевых или лабораторных условиях, на грунтах естественного сложения или грунтовых пастах; можно ли ограничиться одной теплофизической характеристикой или нужен весь комплекс; необходимо ли моделирование внешних условий залегания пород (температуры, давления и др.), а также сопутствующих процессов и явлений [4].

В современной практике определения теплофизических характеристик грунтов существует не так много методов и установок, позволяющих определить не одну теплофизическую характеристику, а весь комплекс. Одним из таких методов является метод монотонного режима. Это такой режим разогрева-охлаждения образцов, при котором в опыте внутри образца одновременно сохраняются малыми температурные перепады и почти равномерное поле скоростей изменения температуры [10].

Исследования осуществлялись на приборе «ИТС-λС-10» (рис. 1), который выполнен в виде двух блоков: теплоизмерительной ячейки и специализированного электронно-вычислительного устройства — теплофизического контроллера (ТФК). Один из металлических блоков размещается при комнатной температуре, а второй блок — в морозильной камере, при заданной отрицательной температуре.

Между изотермическим ядром и образцом, с одной стороны, и средой, с другой стороны, принудительно создается значительный перепад температуры. Для этого предназначены массивные блоки 5, один из которых постоянно находится при комнатной температуре, а другой — в морозильной камере.

Ядро 1 ячейки образовано двумя металлическими стаканами. Внутренний стакан 7 диаметром 4 см и высотой 5 см имеет крышку и является съемной деталью ячейки. Он предназначен для размещения исследуемого образца и во время опыта находится в хорошем тепловом контакте с промежуточным тонкостенным стаканом, благодаря чему металлическое ядро 1, изменяя во времени свою температуру, сохраняет на всех этапах опыта практически равномерное температурное поле. Теплоизоляционная прослойка используется для создания оптимального режима охлаждения-нагрева образца, а также играет роль тепломера.

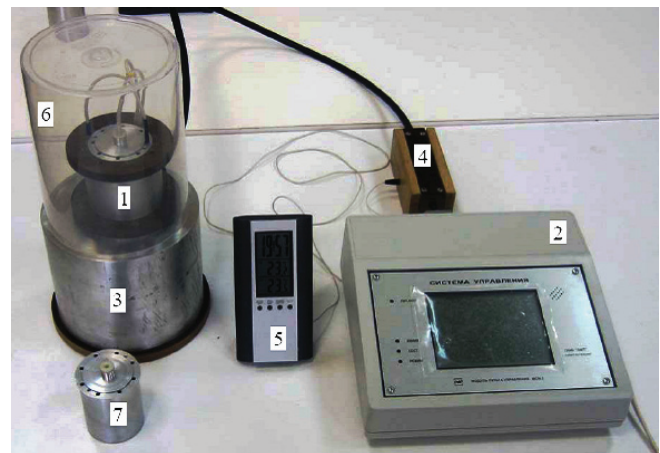


Рис. 1. Измеритель теплофизических свойств грунтов «ИТС-λС-10»: 1 — теплоизмерительная ячейка; 2 — теплофизический контроллер; 3 — массивные металлические блоки; 4 — теплозащитная коробка для «холодных» спаев; 5 — цифровой термометр; 6 — тонкостенный прозрачный колпак; 7 — металлический стакан для размещения образца исследуемого материала.

Для измерения температуры в характерных точках теплоизмерительной ячейки используются три температурных датчика, изготовленных из марганца и константана. Их рабочие спай размещаются внутри жестких полимерных наконечников и перед опытом вставляются в соответствующие отверстия теплоизмерительной ячейки. «Холодные» спай всех термопар размещаются при комнатной температуре в общей теплозащитной коробке непосредственно на рабочем столе рядом с контроллером. Для измерения комнатной температуры используется цифровой термометр. Открытая верхняя поверхность теплоизмерительной ячейки и рабочие концы температурных датчиков защищены от влияния конвективных потоков тонкостенным прозрачным колпаком. Температура в опытах регистрировалась через каждые 10 с.

Производилось три цикла замораживания-оттаивания с каждым образцом. Регистрация данных осуществлялась с помощью контроллера. По результатам опытов по специальной программе вычисляются удельная теплоемкость и теплопроводность исследуемого образца грунта в зависимости от изменения температуры, причем отдельно как в режиме замораживания, так и в режиме оттаивания образца.

Результаты и их обсуждение

Исследование теплопроводности λ проводилось на 9 образцах песка. На рис. 2 приведены экспериментальные данные, полученные для незасоленного незасоленного грунта. Для чистого незасоленного незасоленного грунта было приготовлено два параллельных образца с заданными значениями влажности и плотности, и проведено несколько методических опытов с целью определения оптимального режима проведения эксперимента. Представлены результаты измерения λ , полученные в цикле заморозки и в цикле оттаивания. Авторами были проведены опыты в различных диапазонах температур: $-40 \div 23$ °С; $-21 \div 23$ °С. Для меньшего перепада температур данные, получаемые в цикле заморозки выше, чем полученные в цик-

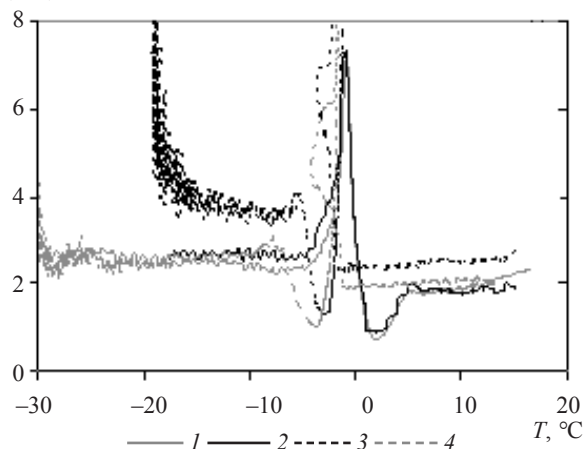


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности чистого песка от температуры в циклах оттаивания и заморозки при разном градиенте температур: 1 — оттаивание (в диапазоне $-40 \div 23$ °С), 2 — оттаивание ($-21 \div 23$ °С), 3 — заморозка ($23 \div -40$ °С), 4 — заморозка ($23 \div -40$ °С)

ле оттаивания. При большем диапазоне различия данных в цикле заморозки и в цикле оттаивания находятся в пределах ошибки прибора. Кроме того, совпадают данные в цикле оттаивания при большом и малом перепадах. Таким образом, был сделан вывод о том, что при использовании данной установки более достоверными стоит считать данные, полученные в цикле оттаивания, а оптимальным режимом — наибольший перепад температур. Также на это указывает тот факт, что получаемая температура начала заморозки грунта отличается в цикле заморозки и оттаивания. Специальные исследования температуры заморозки показали сходимость результатов, полученных криоскопическим методом на приборе «ИРТ-2» и на измерителе «ИТС-λС-10» в цикле оттаивания.

Коэффициент теплопроводности талого грунта меньше коэффициента теплопроводности мерзлого грунта из-за различий в значениях λ воды и льда. Стоит обратить внимание на сам ход температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Полученный график отличается от классического, известного по литературным данным. На нем в области интенсивных фазовых переходов зафиксирован интенсивный рост теплопроводности и последующее ее снижение до значений, характерных для мерзлого грунта. Разработчики прибора «ИТС-λС-10» отмечают, что в области интенсивных фазовых переходов прибор работает некорректно и, следовательно, данные этого температурного диапазона подлежат дополнительной проверке и особому осмыслению.

Влияние нефтяного загрязнения. На рис. 3 представлены результаты исследования теплопроводности песка с различной степенью загрязнения. При загрязнении происходит добавка низкотеплопроводного компонента (по отношению к основному поровому флюиду — воде), что может приводить к понижению теплопроводности грунта. Однако это явление имеет место при больших значениях влажности (W) [2, 9]. В нашем случае в песке при $W = 9\%$ и нефтяном загрязнении 8% происходит увеличение λ из-за замены низкотеплопроводного воздуха более теплопроводной

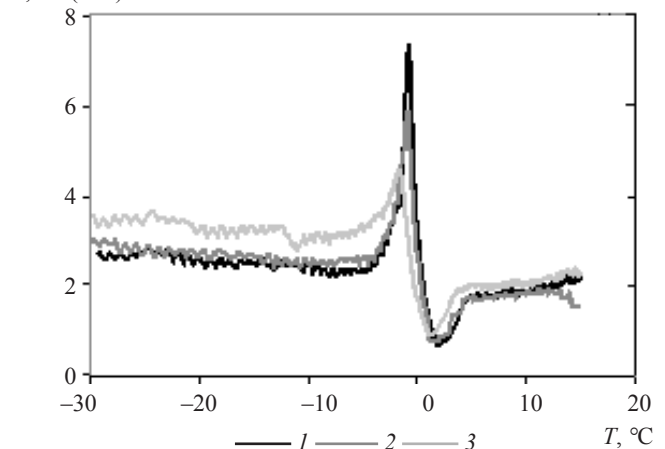


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности незасоленного загрязненного песка от температуры: 1 — $z = 0\%$, 2 — $z = 2,5\%$, 3 — $z = 8\%$

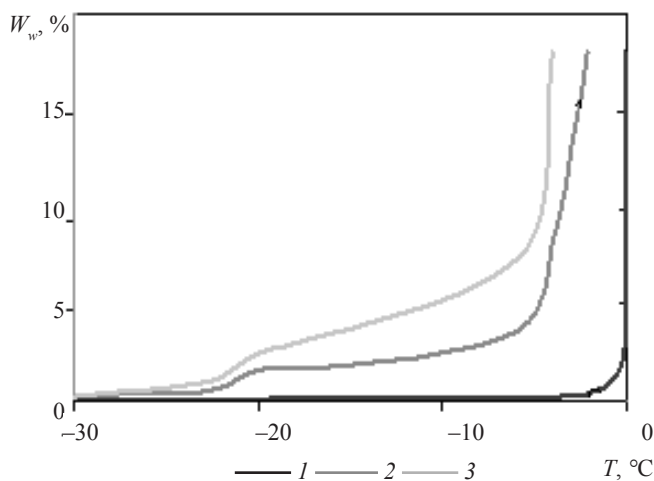


Рис. 4. Зависимость содержания незамерзшей воды от температуры в песке: 1 — $D_s = 0\%$; 2 — $D_s = 0,5\%$; 3 — $D_s = 1\%$

нефтью. Загрязнение 2,5% не оказывает влияния на λ грунта. Таким образом, конкурирующее влияние двух факторов: увеличение λ за счет увеличения степени заполнения пор и уменьшение общей теплопроводности за счет добавки низкотеплопроводного компонента, приводит к неоднозначному влиянию нефтяного загрязнения на теплопроводность грунтов разной влажности.

Интересно отметить уменьшение на графиках пика в области интенсивных фазовых переходов при увеличении нефтяного загрязнения. Этот факт требует дополнительных исследований.

Влияние засоления. Исследования фазового состава влаги засоленных грунтов показали, что в температурном диапазоне $-21 \div -23$ °C возможно образование криогидрата соли NaCl при достижении эвтектических концентраций [1, 5]. Нефтяное загрязнение как в незасоленном, так и в засоленном грунте не оказывает влияния на содержание незамерзшей воды в нем [6, 7]. На рис. 4 показаны результаты экспериментального определения фазового состава влаги в исследованном песке. Видно, что количество незамерзшей воды увеличивается с увеличением засоления. Для песка с засолением как 0,5, так и 1% происходит скачкообразное уменьшение количества незамерзшей воды в температурном диапазоне $-21 \div -23$ °C. Для засоленного песка пик значений теплопроводности в области фазовых переходов значительно ниже, чем в незасоленном грунте (рис. 5). Это связано с меньшим количеством льда в засоленном грунте. В температурном диапазоне $-21 \div -23$ °C на графиках теплопроводности фиксируется пик, соответствующий фазовому переходу раствора в криогидрат. Данные теплопроводности, полученные для мерзлого грунта, требуют дополнительных исследований как методического, так и теоретического плана.

При добавлении нефти в засоленный грунт характер изменения теплопроводности остается таким же, как для незагрязненного песка. Это, по-видимому, связано с изменением соотношения нефти и незамерзшей воды в поровом растворе грунта, что вызывает изменение свойств порового водо-нефтяного флюида, например, вязкости.

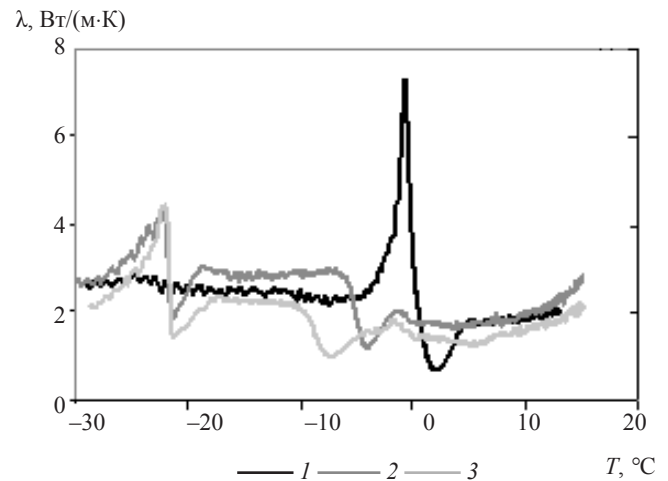


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности засоленного незагрязненного песка от температуры: 1 — $D_s = 0\%$; 2 — $D_s = 0,5\%$; 3 — $D_s = 1\%$

Заключение

В результате исследования теплофизических свойств маловлажного песка с помощью установки «ИТС-ЛС-10» были выявлены некоторые методические особенности работы с прибором, как то, что более корректные данные получаются в цикле оттаивания, а оптимальным режимом является нагрев при наибольшем перепаде между начальной температурой образца и температурой среды, в которую он помещается. Полученные данные для загрязненного песка позволяют говорить о конкурирующем влиянии на его теплопроводные свойства двух факторов: увеличение λ за счет увеличения степени заполнения пор и уменьшение общей теплопроводности за счет добавки низкотеплопроводного компонента. Таким образом, нефтяное загрязнение оказывает неоднозначное влияние на теплопроводность песка. Практически непрерывное измерение характеристик во всем температурном диапазоне для засоленного грунта подтвердило образование криогидрата хлорида натрия в интервале $-21 \div -23$ °C.

Также в ходе исследования впервые были получены данные по теплопроводности совместно засоленного и загрязненного песка. При добавлении нефти в засоленный грунт характер изменения теплопроводности остается таким же, как для незагрязненного песка, т. е. преобладающим оказывается влияние засоления.

Список литературы

1. Еришов Э. Д., Мотенко Р. Г., Комаров И. А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов. // Геоэкология. 1999. № 3.
2. Журавлев И. И., Мотенко Р. Г., Еришов Э. Д. Формирование теплофизических свойств мерзлых дисперсных пород при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами. // Геоэкология. 2005. № 1.
3. Зыков Ю. Д., Мотенко Р. Г., Анисимова И. В., Журавлев И. И. Влияние нефтяного загрязнения на свойства мерзлых пород. // Криосфера Земли. Т. IX, № 3.
4. Методы геокриологических исследований / Под. Ред. Э. Д. Еришова. — М.: МГУ, 2004.

5. Мотенко Р. Г., Комаров И. А. Результаты экспериментальных исследований фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов./Материалы 1 конференции геокриологов России. Кн. 2. — М., 1996.

6. Гречищева Э. С., Мотенко Р. Г. Фазовый состав влаги засоленных мерзлых грунтов при их нефтяном загрязнении. Мат-лы IV конференции геокриологов России. Кн. 1. — М.: изд-во МГУ, 2011.

7. Мотенко Р. Г., Гречищева Э. С. Экспериментальное исследование совместного влияния засоления и нефтяного загрязнения на температуру замерзания и фазовый состав влаги в грунте. Труды 9 международного симпозиума по развитию холодных регионов. Якутск, 2010.

8. Мотенко Р. Г., Кирюхина Т. А., Гераскина Е. В., Натитник И. М., Лазарева Е. В. Оценка влияния нефтяного загрязнения на теплопроводность грунтов на основе результатов комплексных экспериментальных исследований. Материалы международной конференции «Город и геологические опасности». — М., ГУ ЦИСН, 2006.

9. Мотенко Р. Г., Чеверев В. Г., Журавлев И. И. Влияние нефтяного загрязнения на теплофизические свойства мерзлых дисперсных пород. «Геофизические исследования криолитозоны»/Сб. науч. тр. Вып. 3. — М., 2000.

10. Теплофизические измерения: Учеб. Пособие/Под ред. Е. С. Платунова. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2010.

Поздравляем с юбилеем!

Президенту МАХ,
академику А. В. Бараненко



В.В. ВОЛКОВ
Председатель АПИМХ
член-корр. МАХ

Уважаемый Александр Владимирович!

Белорусская Ассоциация предприятий индустрии микроклимата и холода (АПИМХ) и Представительство МАХ в Республике Беларусь поздравляет Вас и возглавляемый Вами Президиум Международной академии холода с 20-летием научной и организационной деятельности!

Деятельность Международной академии холода объединила интеллектуальный потенциал лучших ученых России и мира с целью эффективного развития фундаментальных и прикладных исследований в области холодильной и пищевой индустрии.

Свыше 1600 индивидуальных членов МАХ из разных стран активно участвуют в возрождении российского холодильного машиностроения, разработке стратегических направлений развития техники

низких температур и пищевых технологий с учетом требований энергоэффективности, охраны озонового слоя и сохранения климата нашей планеты.

Желаем всем членам Вашей организации крепкого здоровья, творческих успехов в достижении новых научных и практических результатов!



Б.Д. ТИМОФЕЕВ
Руководитель
Представительства МАХ
в Беларуси, академик МАХ

22-я Международная выставка продуктов питания и напитков



World Food Moscow

16–19 сентября 2013

Москва, ЦВК «Экспоцентр»

➤ **Выставка продуктов питания World Food Moscow** охватывает весь продовольственный рынок и является признанной площадкой для вывода новых продуктов на российский рынок.

www.world-food.ru