

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА
ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДЫ ИЗ ГРУНТОВ В
АНОМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ
ВНЕЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Хмелёв Владимир Николаевич



Доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель РФ, Senior Member IEEE. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, автор более 1000 научных публикаций (в т.ч. более 100 патентов, более 20 монографий и учебников)

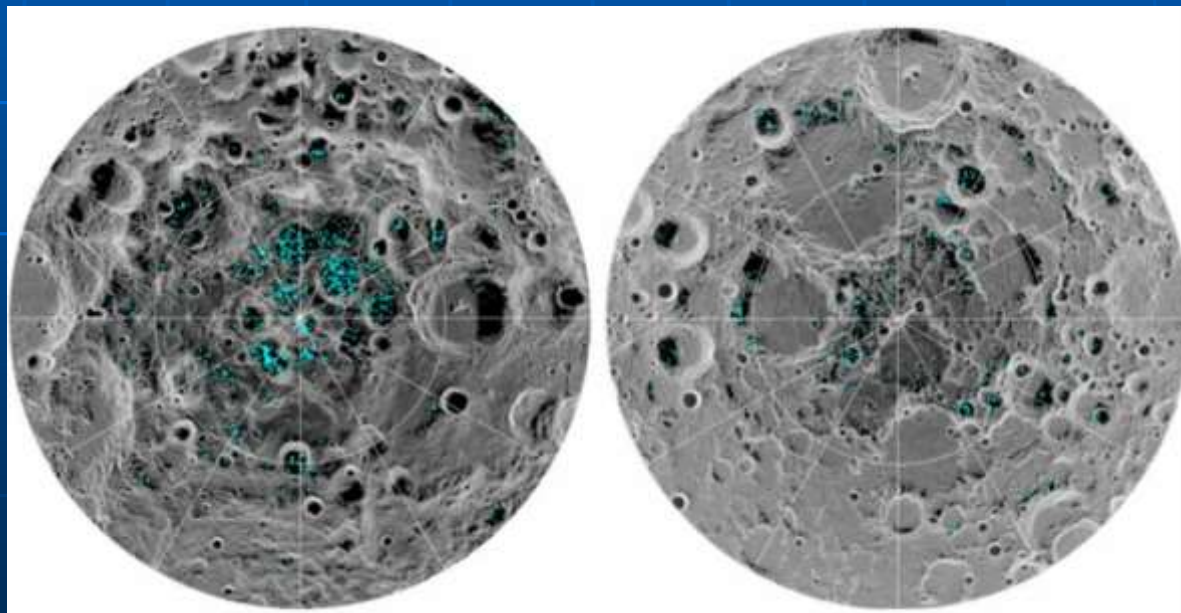
Зам. директора по научной работе Бийского технологического института ФГБОУ ВО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова".

+7 9039925120
vnh@u-sonic.ru

Цель добычи воды на Луне

- Большой научный интерес (возможное наличие жизни, проведение экспериментов невозможных на земле);
- Возможность колонизации (добыча кислорода, выращивание растений, выживание человечества в случае глобальных катастроф на Земле);
- Добыча водорода для получения топлива (запуск космических аппаратов с луны для исследования дальнего космоса).

Предполагаемое наличие льда на полюсах луны по результатам обработки данных с прибора NASA Moon Mineralogy Mapper (M3) (светоотражающие свойства, способность молекул поглощать инфракрасный свет)



Состояние проблемы обнаружения и добычи воды на луне

Известные методы обнаружения и добычи воды

- дистанционный анализ поверхности луны с целью обнаружения воды;
- отбор проб грунта на поверхности внеземных объектов и лабораторный анализ этих проб на содержание воды после доставки грунта на Землю;
- захват грунта роботом в затененном участке луны, перемещение робота на освещенное солнцем пространство, затем плавление льда и испарение воды за счет энергии солнца и конденсация (Курчатовский институт);
- сублимация льда или испарение воды за счет подвода тепла и затем конденсация пара.

Все эти методы обнаружения и добычи воды являются энергетически затратными

Способ решения проблемы

Для решения проблемы необходимо создать технологию обнаружения и добычи с уменьшенными энергозатратами непосредственно на вземном объекте. Одним из вариантов является интенсификация процесса добычи воды за счет специальных энергетических воздействий при помощи

ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковые колебания – это колебательное движение упругой среды с частотой более 20 кГц. УЗ колебания могут распространяться в любых материальных средах (прозрачных и непрозрачных, проводниках и диэлектриках и т.п.). Интенсивность УЗ колебаний может достигать 1 кВт/см², что приводит к возможности реализации и интенсификации множества технологических процессов (сварка, сверление, пропитка, растворение, очистка, дегазация, полимеризация, эрозия, сушка и многие другие).



УЗ воздействия для интенсификации добычи воды

Практическая реализации добычи воды при ультразвуковом воздействии

Сложность введения ультразвуковых колебаний в грунт при аномальных условиях низких температур и давлений

Малое сокращение продолжительности процесса, его зависимость от вида материала, его количества и размера частиц

Отсутствие технических решений по реализации процесса в космических условиях

Отсутствие зависимостей эффективности ультразвукового добычи воды от условий ультразвукового воздействия

Отсутствие данных о наличии и величине «порогового значения интенсивности УЗ воздействия» при котором ультразвуковая добыча воды становится эффективной

Невозможность обеспечения режима ультразвукового воздействия, энергетически выгодного для реализации процесса, но не превышающего предельных возможностей современных излучателей

Необходимость решения указанных проблем и обуславливает актуальность и необходимость поиска путей интенсификации процесса выделения и добычи воды из лунного грунта

Способы выделения воды из внеземных грунтов



Способы выделения воды
ультразвуковым воздействием

Контактный способ

Бесконтактный способ

Возможность
воздействия в
вакууме

Значительный тепловой
эффект

Значительная площадь
воздействия в случае
промежуточной газовой
среды

Малый износ УЗ излучателя

Процесс выделения воды из внеземных грунтов при различных режимах воздействия ультразвуковыми колебаниями (в том числе без фазового перехода)

Принципы реализации добычи воды

Способы интенсификации добычи воды контактным ультразвуковым воздействием

Возбуждение колебаний стенок камеры с грунтом

Непосредственное воздействие на грунт УЗ излучателем

Возможность автоматического бурения на глубину до нескольких метров

Автоматический контроль наличия воды по анализу акустических колебаний в грунте

Увеличенные объемы получаемой воды

Уменьшенные энергозатраты за счет выделения воды без фазового перехода

Не значительный объем получаемой воды

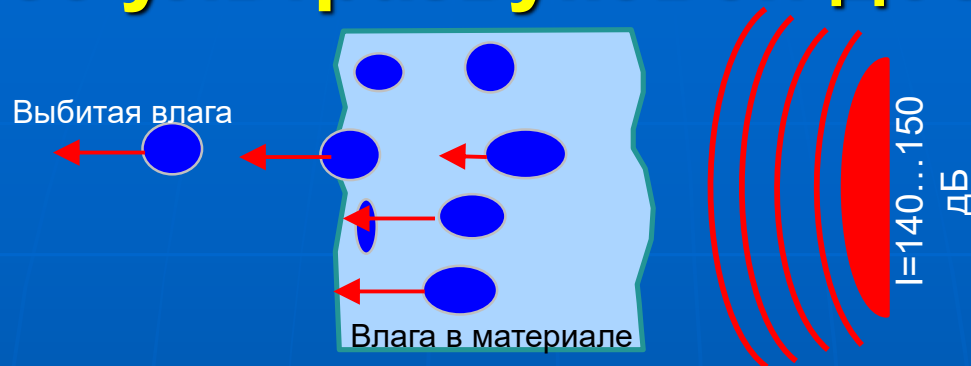
Неопределенность физических параметров грунта (жесткость, твердость, упругость)

Механизированный захват грунта

Отсутствие зависимостей производительности диспергирования от параметров УЗ воздействия и характеристик грунта

Малая исследованность или отсутствие научных и экспериментальных данных

Процесс ультразвуковой добычи воды



Достоинства УЗ добычи

1. Повышение эффективности.
2. Снижение энергопотребления.
3. Возможность добычи при сниженных температурах.

УЗ воздействие обеспечивает максимальное эффективное воздействие на грунт для реализации процесса выделения воды.

При помощи ультразвуковых колебаний можно выделять влагу из пористых грунтов при низких температурах

Ультразвуковое выделение влаги из материалов (сушка)

Сушка – процесс удаления влаги из материала для придания ему новых свойств, длительного хранения, переработки, выделения полезных свойств в жидком виде (экстракция без экстрагента)

Недостатки конвективной сушки:

- Высокая энергоемкость и длительность.
- Ограничение на минимальный размер сушильных машин.
- Невозможность сушки разрушаемых при повышении температуры материалов.
- Возможность пересыхания и порчи.

Сравнительные характеристики способов сушки

Основные преимущества ультразвуковой сушки:

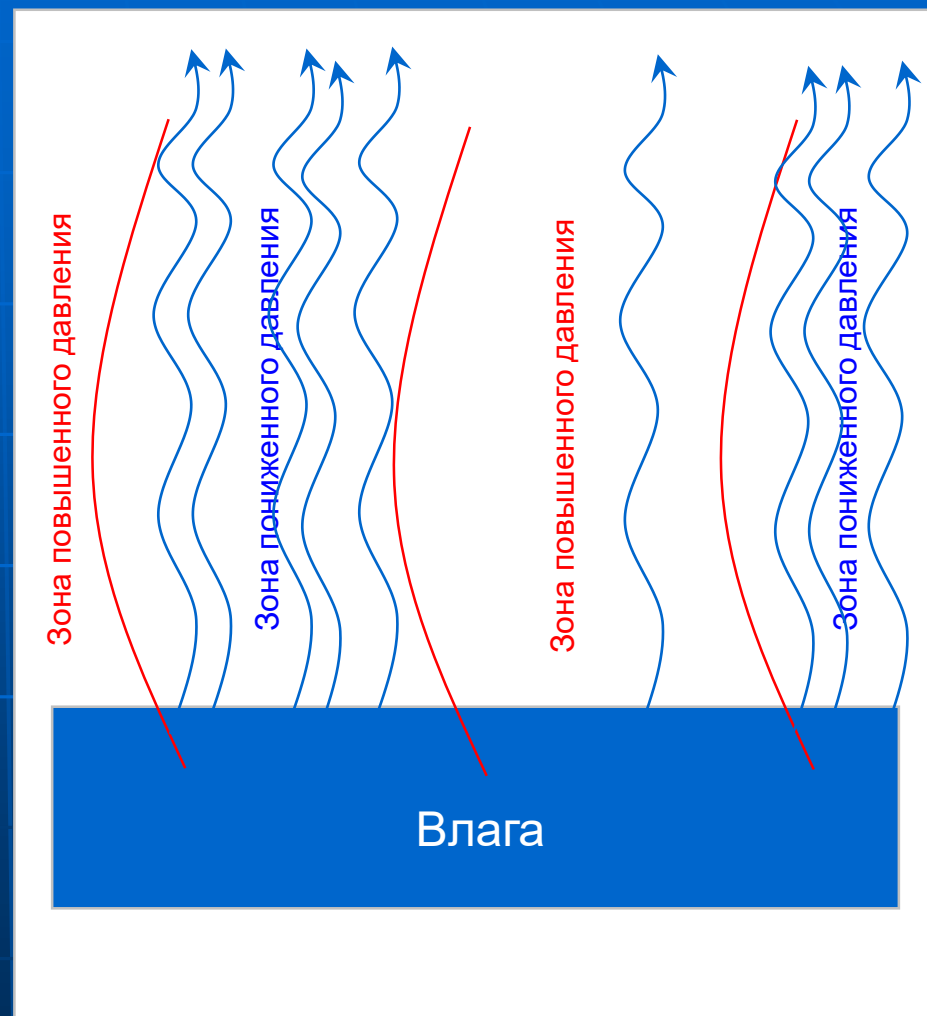
- Снижение энергопотребления.
- Возможность обеспечения качественной и эффективной сушки при более низких температурах воздуха.

Действующие факторы акустического (ультразвукового) удаления влаги



Перепады давления над поверхностью

- При распространении УЗ колебаний над поверхностью грунта образуются быстро сменяющие друг друга зоны повышенного и пониженного давления.
- Согласно гипотезе Буше в зоне повышенного давления скорость процесса удаления влаги практически не замедляется, в то время как в зоне пониженного давления возникает дополнительный эффект вакуумного удаления



Акустические потоки в ограниченном пространстве

- Потоки в жидкой и газовой среде при распространении акустической волны высокой интенсивности вызываются вязким трением
- В безграничной среде акустические потоки ламинарные и направлены вдоль вектора распространения звуковой волны
- В условиях стоячей акустической волны акустические потоки замкнутые, а вблизи пограничного слоя образуют завихрения
- Скорость акустических потоков квадратично зависит от звукового давления и в диапазоне 140-150 дБ составляет 6-10 м/с

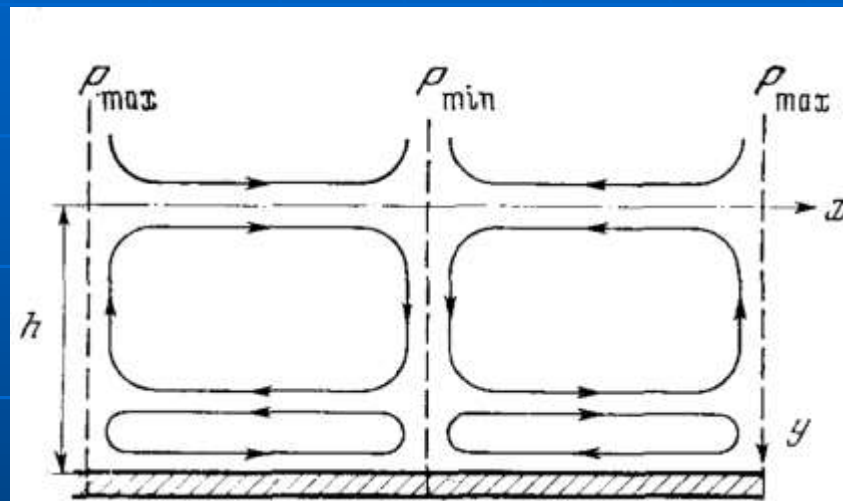
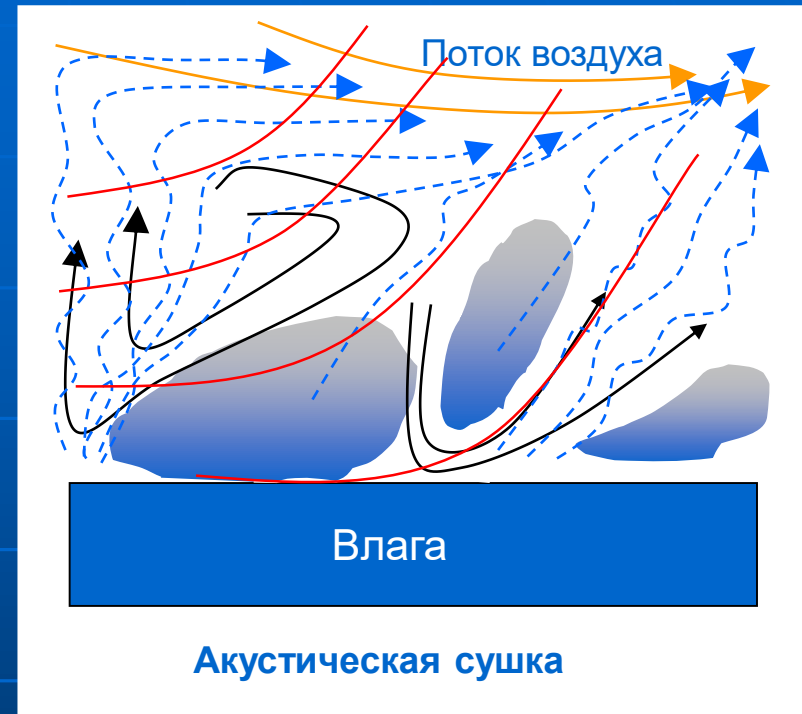
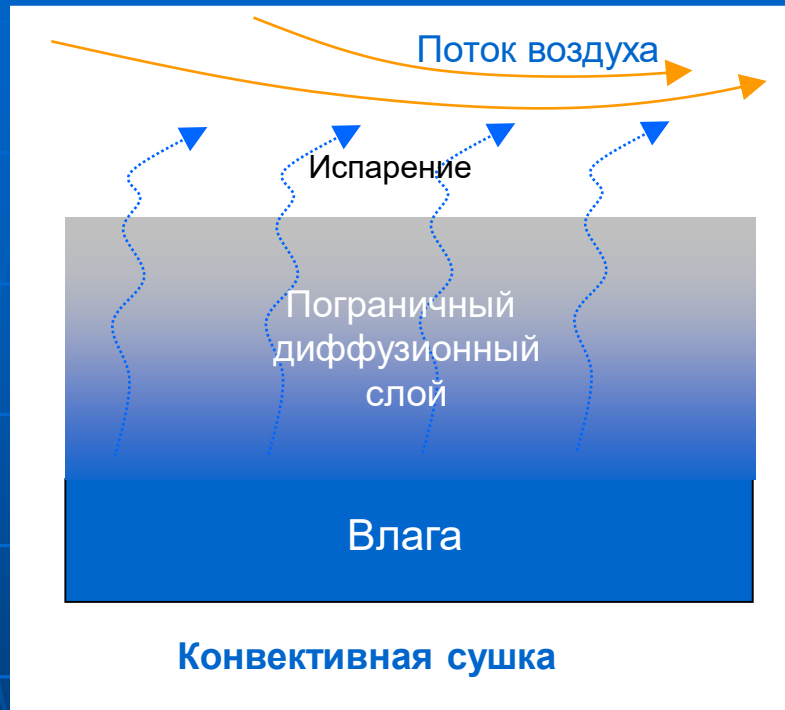


Схема образования акустических потоков в пограничном слое

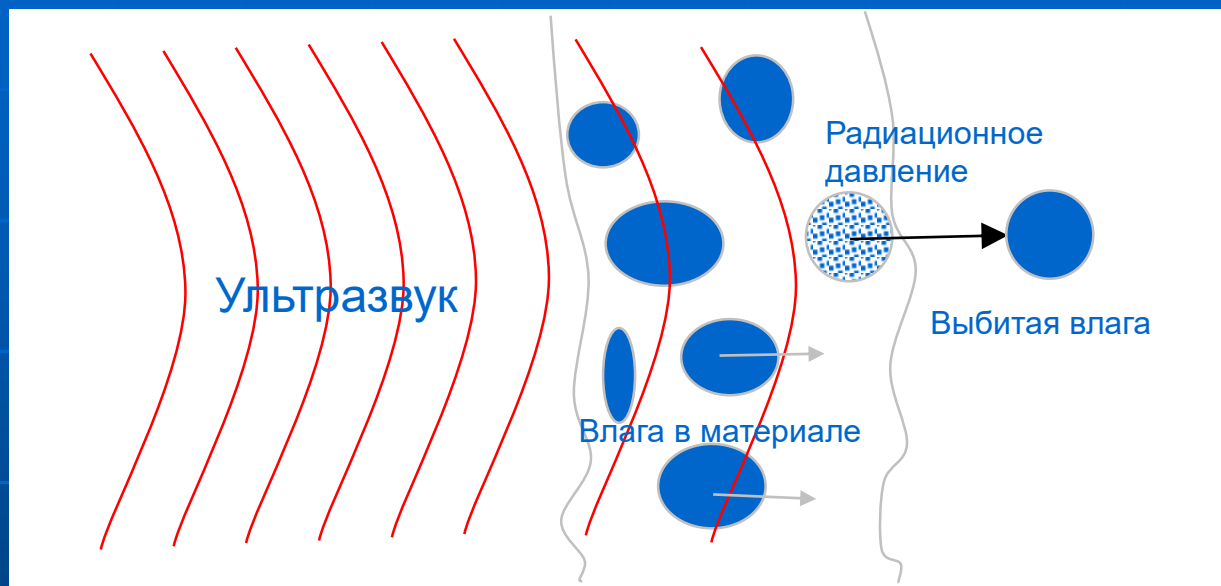
При уровне звукового давления 140-150 дБ основной интенсифицирующей силой удаления влаги являются акустические потоки, способствующие ускорению процесса испарения влаги и ее удаления из пограничного слоя

Уменьшение толщины пограничного слоя



- Вблизи поверхности влажного материала существует пограничный слой, препятствующий массопереносу. Снижение толщины пограничного слоя обеспечивает прирост скорости удаления влаги.
- Толщина пограничного слоя определяется диффузионными и гидродинамическими процессами.
- При конвективном удалении влаги течение воздуха в приповерхностном слое ламинарное и толщина пограничного слоя определяется в основном диффузионными процессами.
- В интенсивном акустическом поле толщина пограничного слоя резко уменьшается вследствие возникновения турбулентных приповерхностных течений и микропотоков

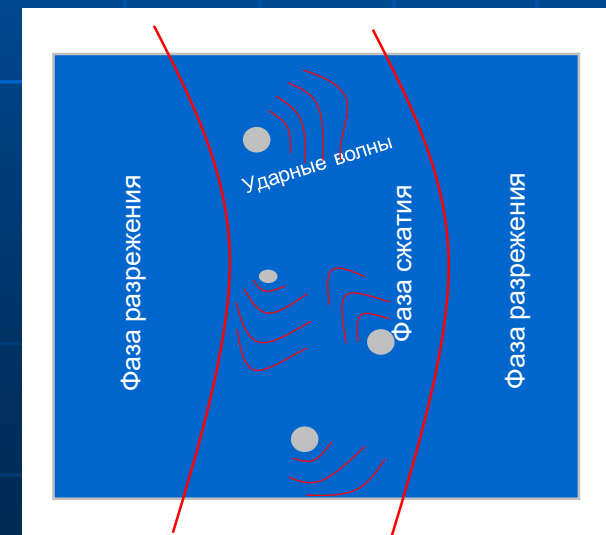
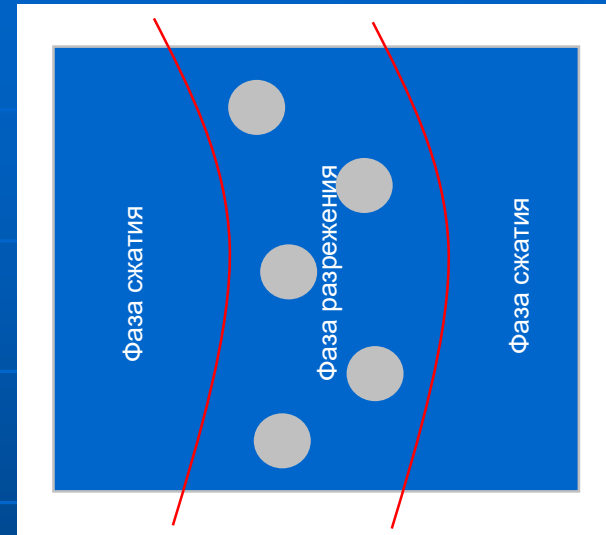
Радиационное давление



- Радиационное давление (давление падающей волны, давление звука) постоянная составляющая давления, действующего на тело, помещенное в ультразвуковое поле.
- Радиационное давление возникает по причине передачи телу части импульса падающей волны при ее поглощении или отражении.
- Радиационное давление, возникающее в УЗ полях интенсивностью свыше 135 дБ способно выдавливать влагу из капиллярно-пористого материала

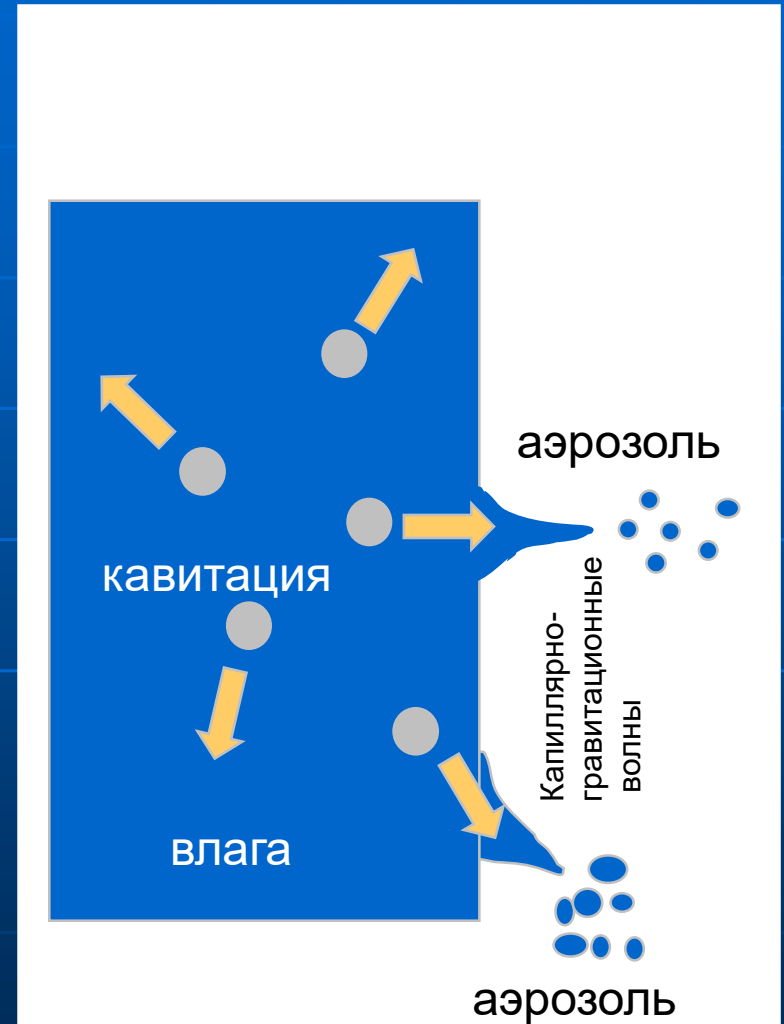
Кавитация

- При распространении в жидкости высокоинтенсивных УЗ колебаний возникает явление кавитации.
- Именно кавитация является основной действующей силой, интенсифицирующей многие физико-химические процессы при воздействии на вещества высокоинтенсивного ультразвука, в том числе и в процессе выделения влаги.
- Кавитация связана с нарушением сплошности жидкости в фазе разрежения, образованием в зоне разрывов парогазовых пузырей и их захлопывания в последующей фазе сжатия.
- В момент захлопывания, благодаря неизбежной асимметрии пузырька возникает кумулятивная струя, вызывающая в жидкости ударную волну



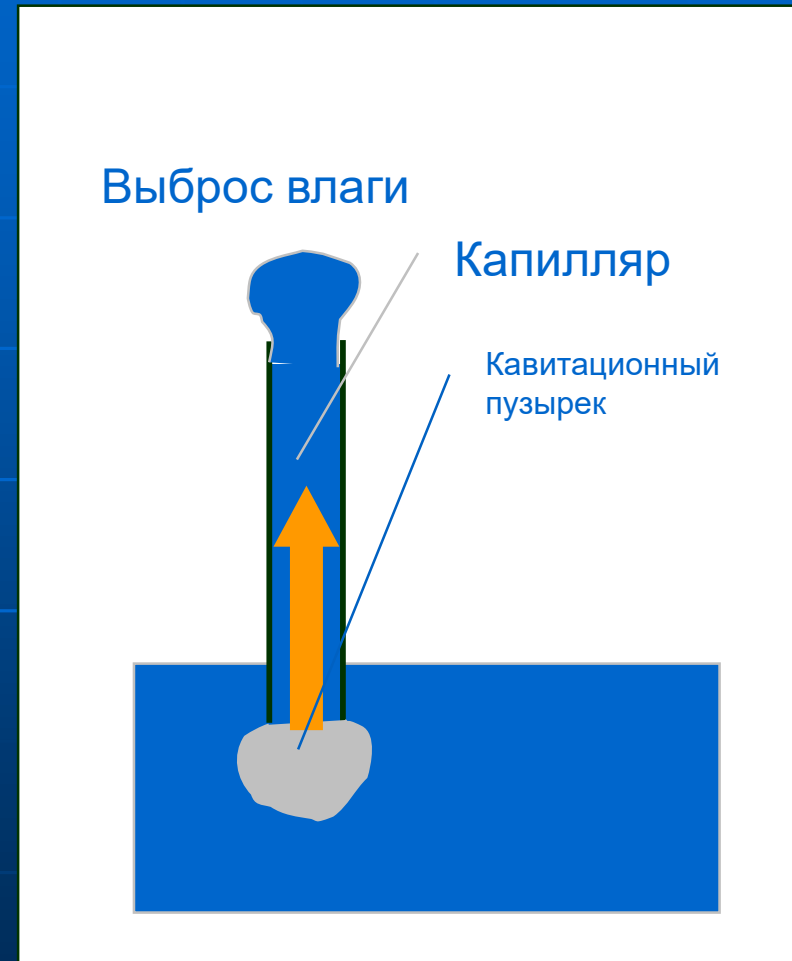
Кавитационное удаление жидкости

- Захлопывание кавитационных пузырьков вблизи свободной поверхности вызывает гравитационно-капиллярные волны. Остроконечные гребни гравитационно-капиллярных волн распадаются на капли.
- Отделившиеся капли образуют аэрозоль, который в отсутствии других воздействий находится в равновесном состоянии.
- При наличии акустических течений, радиационного давления или потока воздуха над свободной поверхностью жидкости происходит эффективное удаление аэрозоля.
- Кавитационное распыление позволяет осуществлять удаление влаги без фазового перехода, что снижает энергоемкость процесса сушки.
- **Кавитационное распыление возникает только при наличии жидкой фазы и достаточной интенсивности УЗ излучения.**



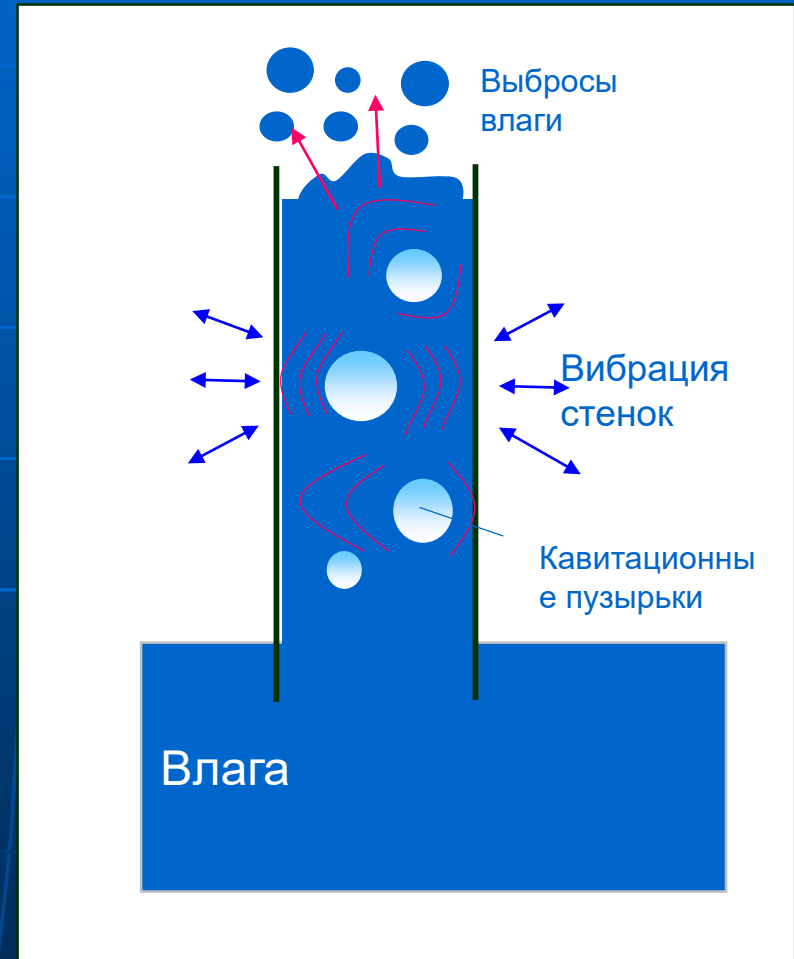
Звукокапиллярный эффект

- Когда кавитационный пузырек развивается на входе в капилляр, ударная волна, возникающая при его захлопывании будет направлена внутрь капилляра.
- Возникающее в капилляре избыточное давление выталкивает столб жидкости наружу. Это явление называется звукокапиллярным эффектом.
- Звукокапиллярный эффект способствует ускоренному переносу влаги из глубинных слоев к поверхности, способствуя таким образом повышению скорости удаления влаги.



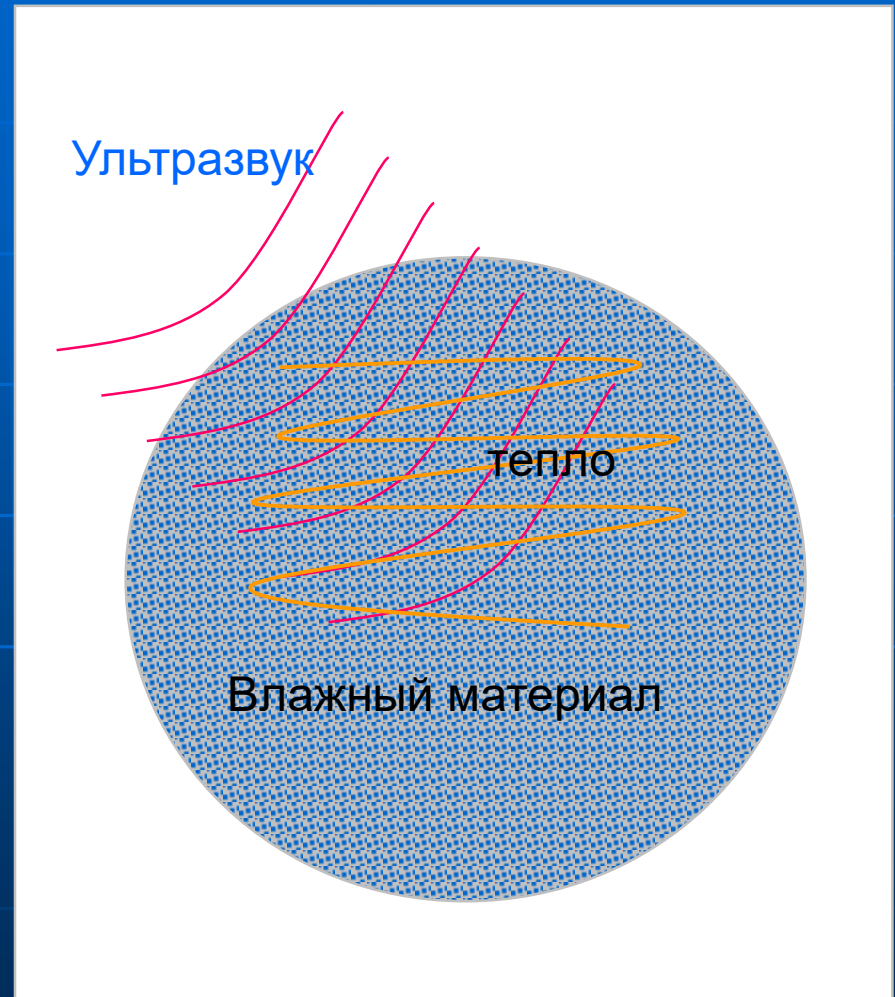
Пульсации и взрывы парогазовых пузырьков в капиллярах, снижение вязкости жидкости

- С развитием в жидкости кавитации, по мере дальнейшего увеличения интенсивности колебаний часть парогазовых пузырьков не успевает захлопнуться в фазе сжатия. В следующей за ней фазе разрежения такие пузырьки вновь увеличиваются в размерах и этот процесс повторяется продолжительное время. Такие пузырьки называют резонансными.
- Пульсации резонансных пузырьков в капиллярах вызывают колебания стенок, что способствует ускорению процесса переноса влаги.
- Взрывы пузырьков в капиллярах также способствуют ускорению процесса переноса влаги.
- Кавитационные пузырьки в жидкости вызывают ее «разрыхление» и, как следствие, снижение вязкости, что тоже является фактором, ускоряющим массоперенос.

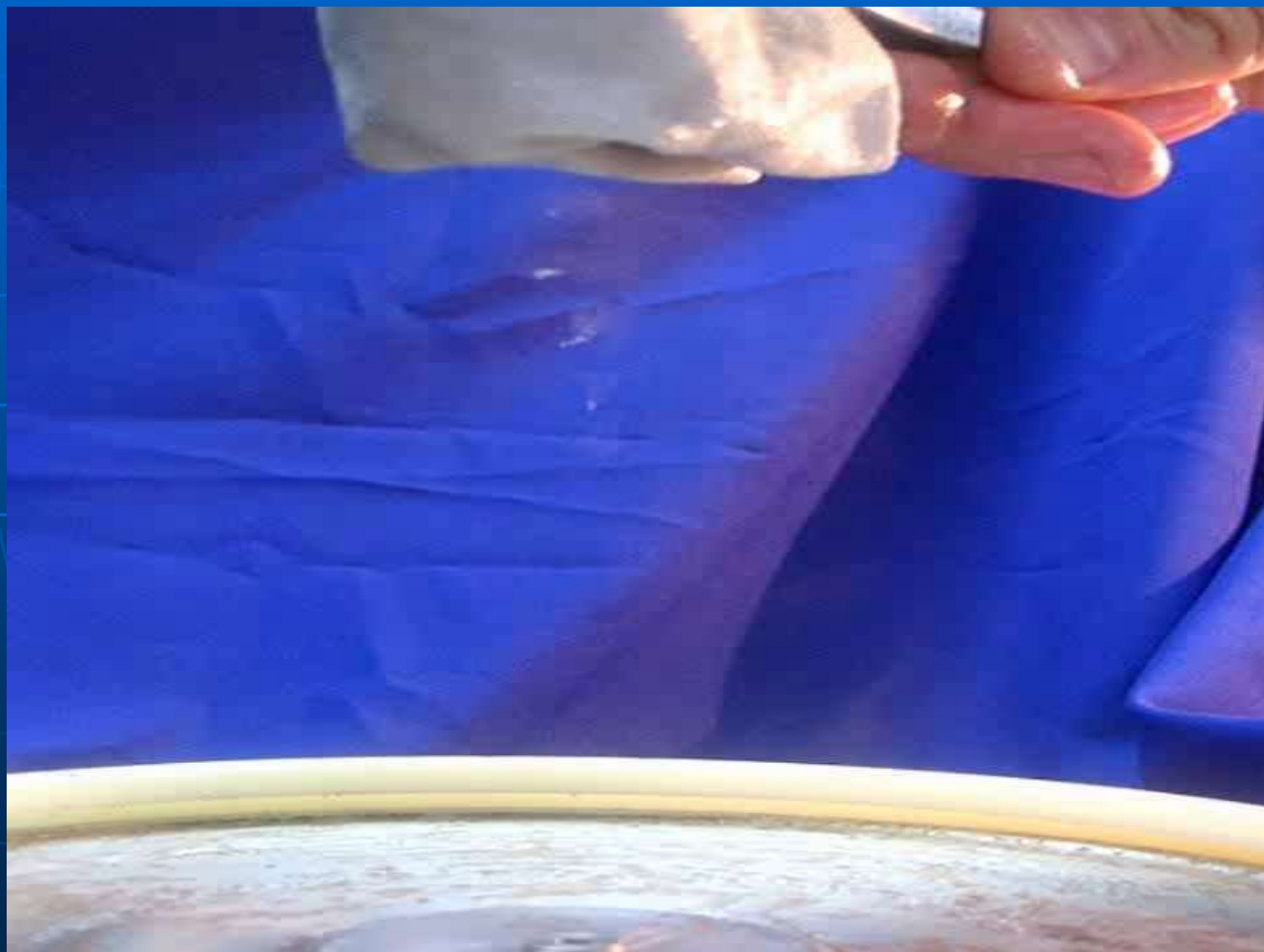


Тепловое действие

- Поглощение ультразвуковых колебаний материалом вызывает его нагрев.
- Нагрев материала, вызванный ультразвуковым излучением происходит практически равномерно по всей глубине что способствует ускоренному переносу влаги из глубинных слоев.
- Тепловое действие ультразвука эффективно проявляется только при высоких интенсивностях (свыше 165 дБ) и в большей мере в насыпных материалах.



Действие ультразвукового излучения на влажный материал



Структура и свойства реголита

Неслоистый, рыхлый, разнотернистый обломочно-пылевой слой, достигающий толщины нескольких десятков метров. Состоит из обломков изверженных пород, минералов, стекла, метеоритов и брекчий ударно-взрывного происхождения, сцементированных стеклом. По гранулометрическому составу относится к пылеватым пескам. Основная масса частиц имеет размер 0,03—1 мм.

Лыков А.В. рассматривает слой песка толщиной 10 см как пористое тело если радиус зерна больше 0,025 мм. Поэтому есть возможность диспергирования влаги из пор и капилляров за счет формирования и схлопывания кавитационных пузырьков.



Фотография реголита,
доставленного «Луной-
16»



Иллюстрация модели
реголита с наличием
льда

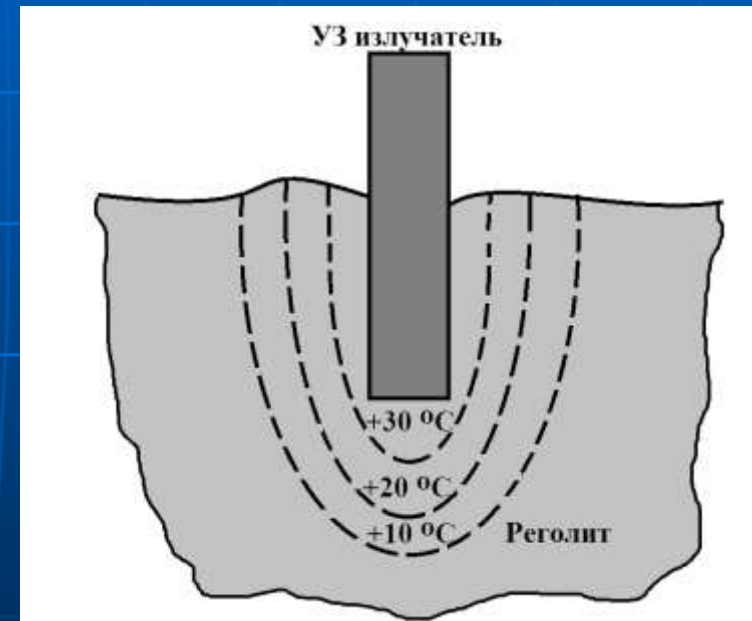
Термическое действие

В результате механического трения между грунтом и поверхностью излучателя создается значительный тепловой эффект.

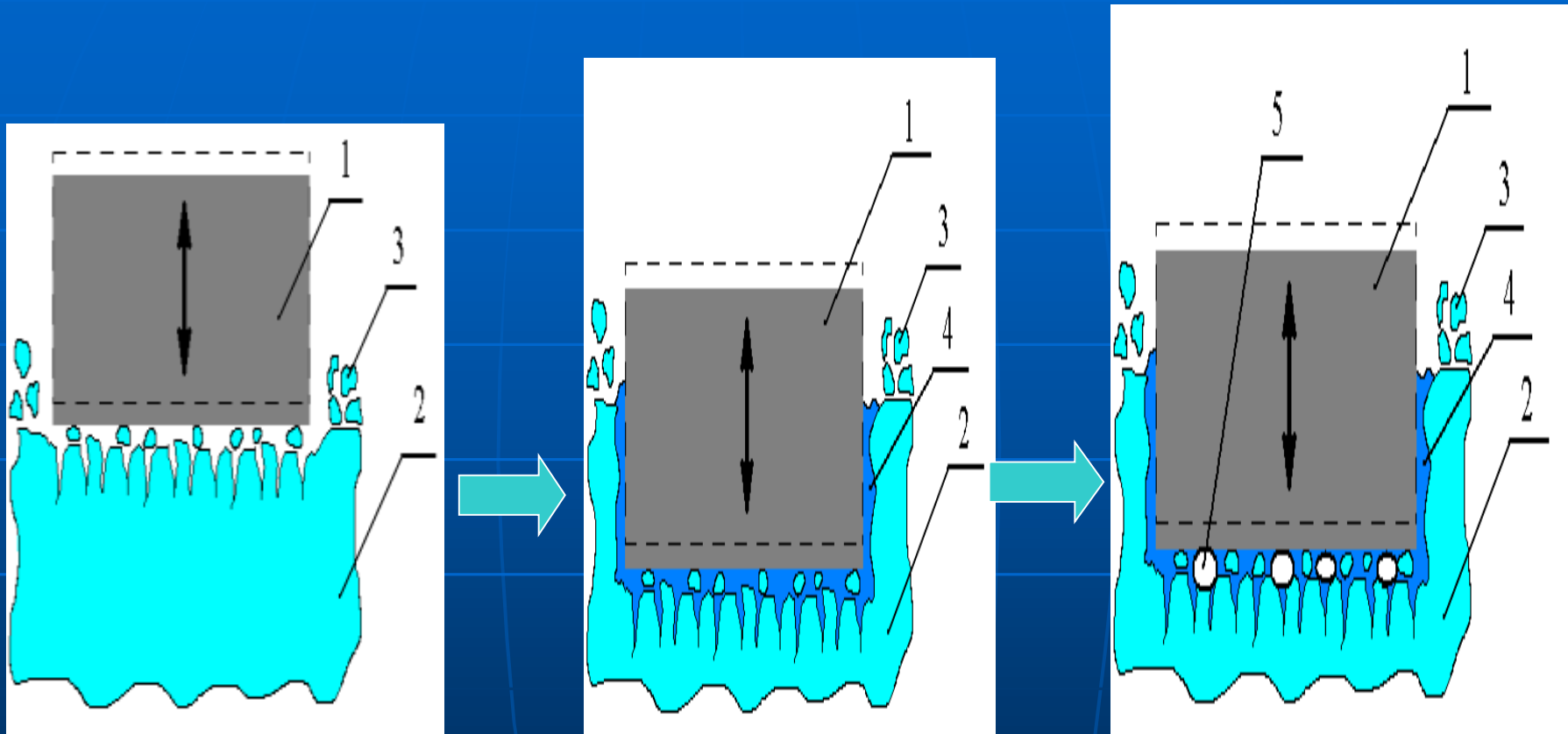
В материалах с макрокапиллярами ($0,2 \text{ мкм} < \text{диаметр} < 20 \text{ мкм}$) и порами ультразвуковые волны сравнительно хорошо проникают внутрь и поглощаются там, осуществляя внутренний нагрев. Заметный нагрев наблюдается в сыпучих материалах и сравнительно слабый – в твердых пористых пластинах.

Результаты экспериментальных исследований по УЗ бурению имитатора лунного грунта (уплотненный песок, крошка песчаника и пр.) при температуре минус 100 градусов Цельсия показали возрастание температуры грунта только за первые 3 минуты воздействия на 25 и более градусов Цельсия на расстоянии 10 мм от излучателя.

Это позволяет сделать предположение о возможности расплавления льда при небольших начальных отрицательных температурах с последующим испарением и диспергированием воды.



Ультразвуковое воздействие на лёд



1 – ультразвуковой рабочий инструмент; 2 – лёд; 3 – осколки льда; 4 – вода;
5 – кавитационные пузырьки

Расчет роста кавитационной полости цилиндрической формы

Из-за наличия ограниченного объема расположения льда в лунном грунте сделано предположение что кавитационный пузырек трансформируется в цилиндрическую форму, поэтому для расчета его роста было использовано уравнение неразрывности и сохранения импульса в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z}$$

r – расстояние от оси симметрии кавитационной полости цилиндрической формы, м; z – координата вдоль оси симметрии кавитационной полости, м u, v – компоненты скорости движения жидкости, окружающей полость, вдоль оси r и вдоль оси z соответственно, м/с; p – давление жидкости, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³

Предполагая, что течение жидкости является потенциальным и используя уравнение Лапласа, решение для потенциала скорости находится в виде:

$$\varphi = -\frac{Br^2}{4} + C \ln r + \frac{Bz^2}{2} + Dz + E$$

где B, C, D, E – функции, зависящие от времени t , но независящие от координат r, z

Подставляем в уравнения сохранения импульса:

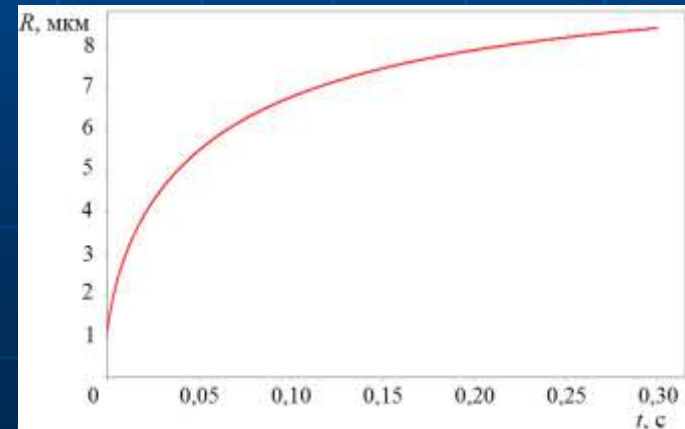
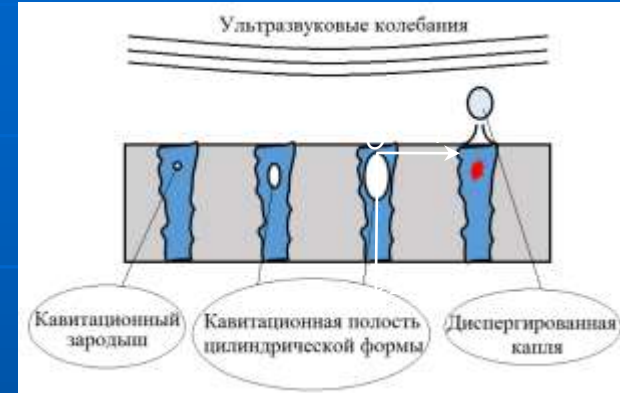
$$p = p_0 - \rho \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{Br^2}{4} + C \ln r + \frac{Bz^2}{2} + Dz + E \right) - \rho \frac{\left(-\frac{Br}{2} + \frac{C}{r} \right)^2 + \left(B^2 z^2 + 2DBz + D^2 \right)}{2}$$

Получаем уравнение для зависимости радиуса кавитационной полости цилиндрической формы от времени:

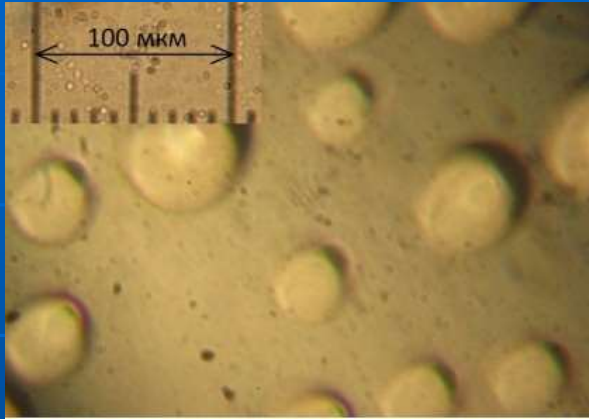
$$R^2 = (R_{cyl0} + R_{cylA} \sin(\omega t))^2 + \frac{\left((R_{cyl0} + R_{cylA} \sin(\omega t_{start}))^2 - R_0^2 \right)^2}{2\omega (R_{cyl0} + R_{cylA} \sin(\omega t_{start})) R_{cylA} \cos(\omega t_{start})} - \frac{\left((R_{cyl0} + R_{cylA} \sin(\omega t_{start}))^2 - R_0^2 \right)}{2\omega (R_{cyl0} + R_{cylA} \sin(\omega t_{start})) R_{cylA} \cos(\omega t_{start})} - t_{start}$$

где t_{start} – время начала ультразвукового воздействия, с; R_{cyl0} – начальный радиус капилляра, м; R_{cylA} – амплитуда колебаний радиуса капилляра, м

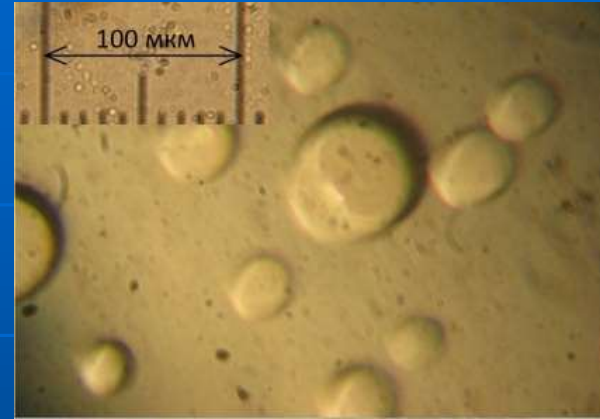
Для диаметра вытянутой поры 20 мкм расширение кавитационного пузырька до размера, достаточного для схлопывания, необходимо около 10⁴ периодов колебаний (не более 0,5 с)



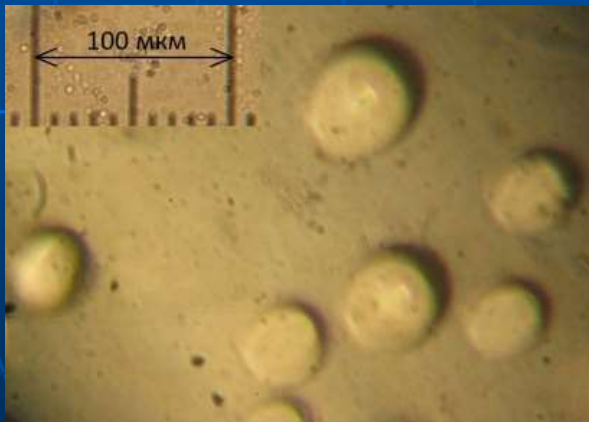
Диспергированная вода при различных влагосодержаниях грунта



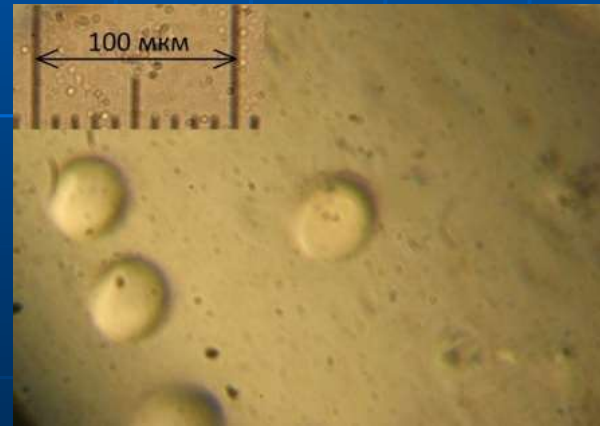
3,5 кг/кг



2,8 кг/кг

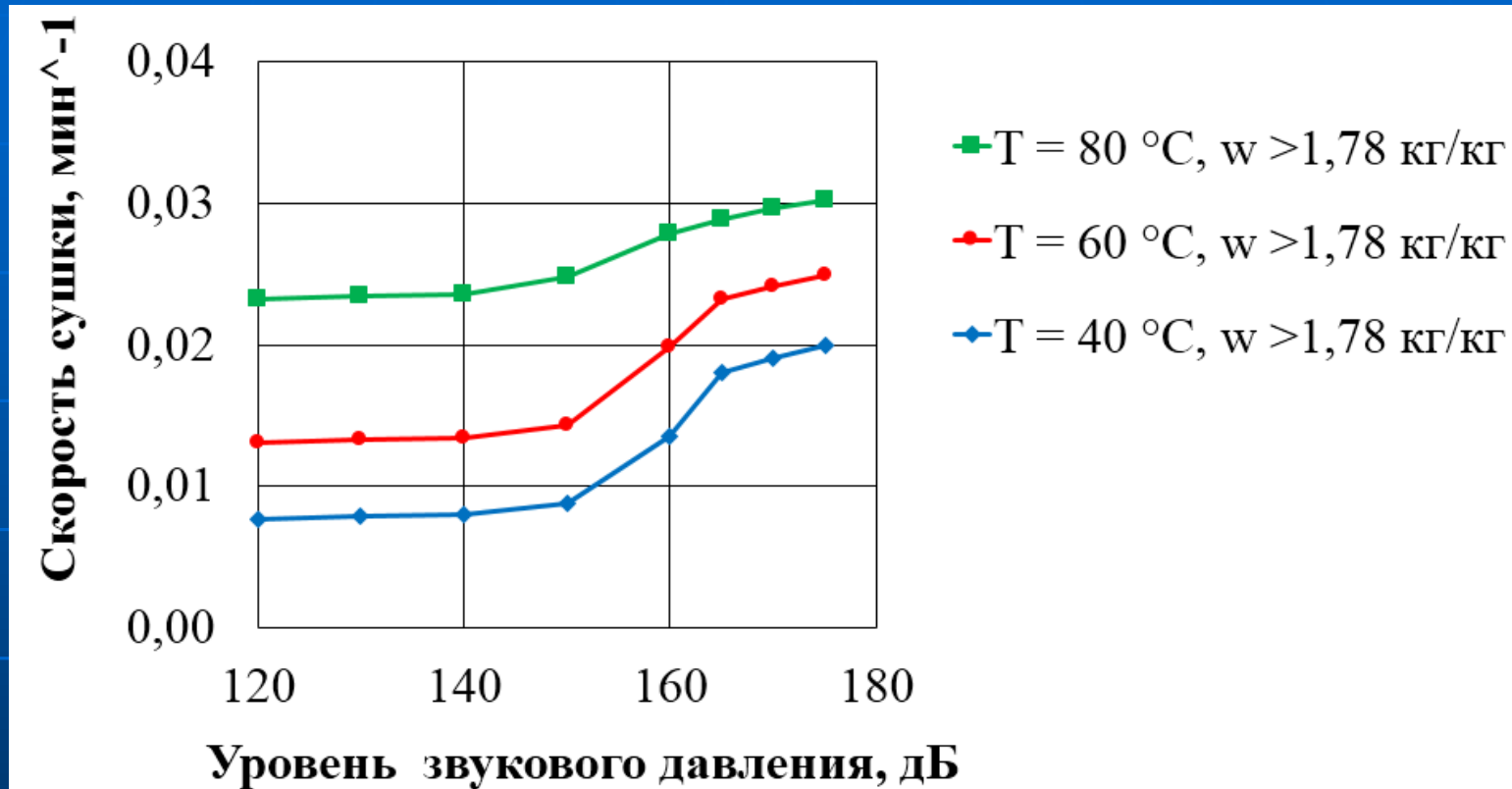


2,2 кг/кг



1,5 кг/кг

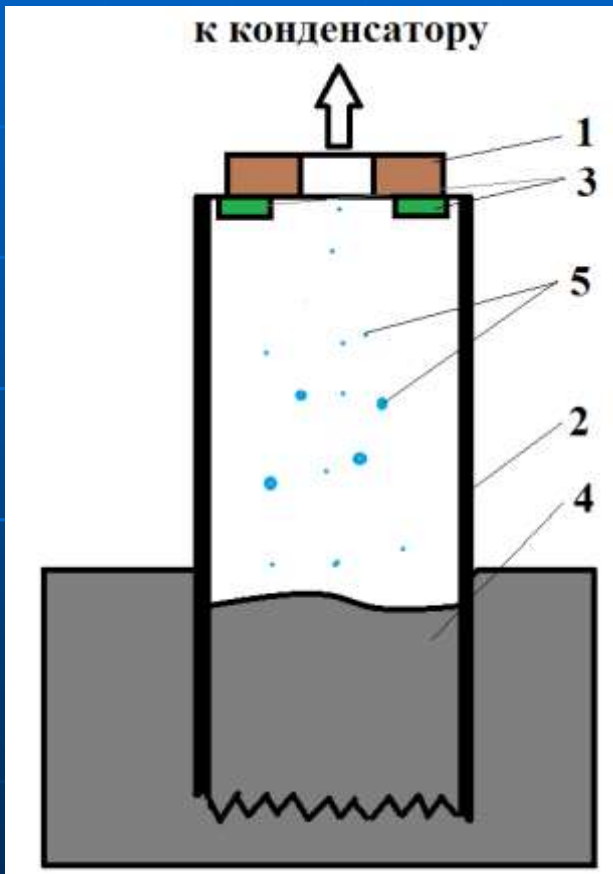
Средние скорости сушки в зависимости от уровня звукового давления



При достаточном количестве влаги в капиллярно-пористом материале происходит ее диспергирование при уровне звукового давления более 150 дБ, причем относительная эффективность диспергирования тем выше, чем ниже температура.

Технологии добычи воды

УЗ технология возбуждения стенок трубчатой камеры



- 1 Пьезокерамика
- 2 Стенки трубчатого УЗ излучателя
- 3 Дополнительные датчики наличия воды (при необходимости)
- 4 Грунт (реолит)
- 5 Водяные капли и пар

Предлагается использовать на глубинах около одного метр, где температура реолита постоянная (около минус 35 градусов Цельсия). Можно применять для обнаружения наличия воды в реолите за счет обработки акустических колебаний и информации с дополнительных датчиков и принятия решения о возможности дальнейшей добычи воды.

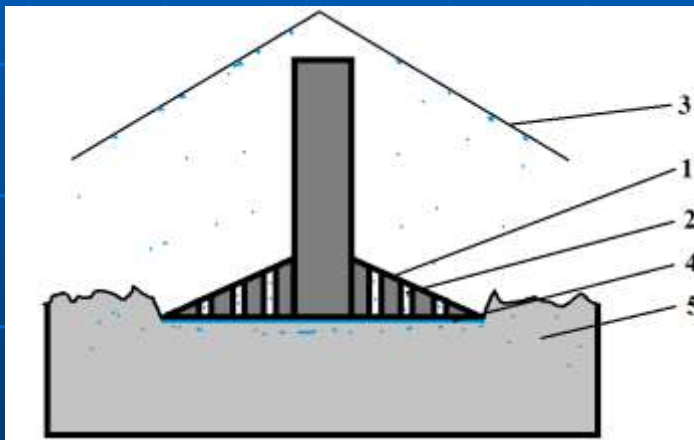
Добыча в небольших объемах.

Технология контактного УЗ воздействия излучателем

Предполагается использовать для добычи воды из реголита содержащего водяной лед. При непосредственном воздействии на грунт происходит сублимация, испарение и диспергирование воды с осаждением и конденсацией на крышке-конденсаторе, после чего крупные капли стекают в емкость для воды и льда.

Преимущества:

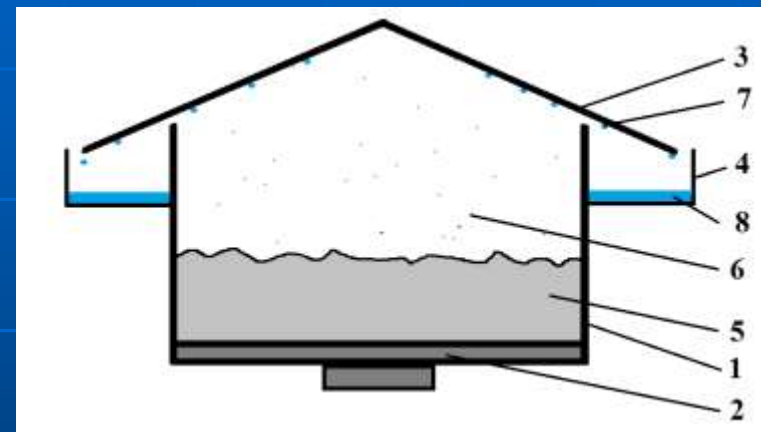
- 1 Возможность бесфазового выходы воды
- 2 Снижение затрат



УЗ воздействие сверху

1 УЗ излучатель-бур; 2 Каналы для выхода пара; 3 Конденсатор; 4 Вода; 5 Реголит со льдом

Распространение и поглощение УЗ колебаний в грунте до нескольких десятков сантиметров



УЗ воздействие снизу

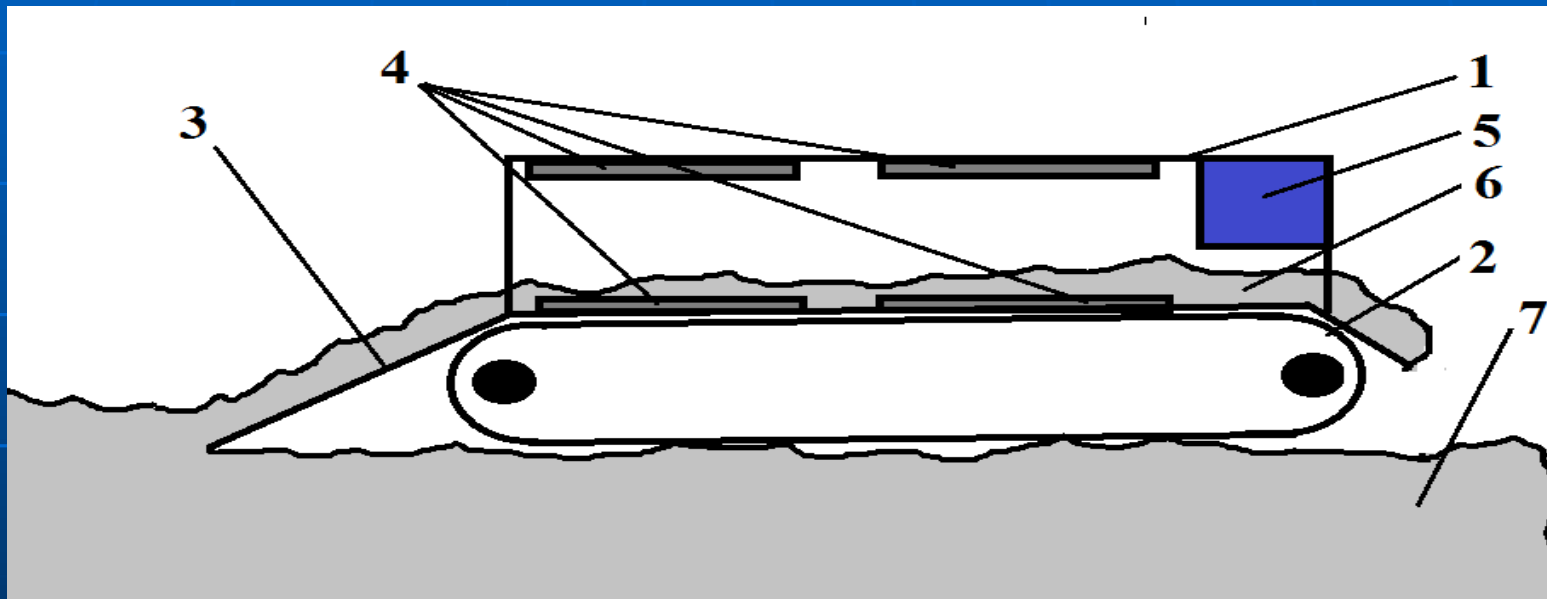
1 Корпус сушилки; 2 УЗ излучатель
3 Крышка – конденсатор; 4 Емкость для воды и льда; 5 Грунт (реголит); 6 Водяные капли и пар; 7 Сконденсированные капли воды; 8 Вода и лед

Большая площадь УЗ контактного воздействия

Технология бесконтактного УЗ воздействия

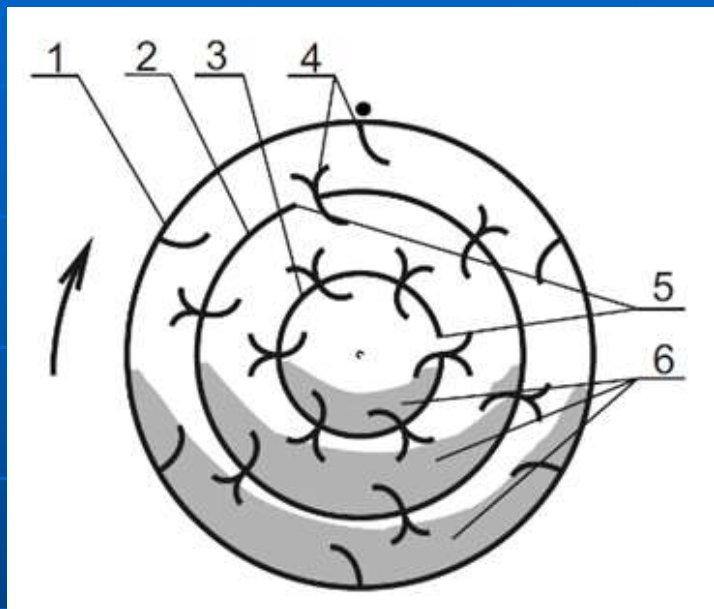
Предполагает наличие газовой среды добытой из реголита
или введенной искусственно

УЗ добытчик воды

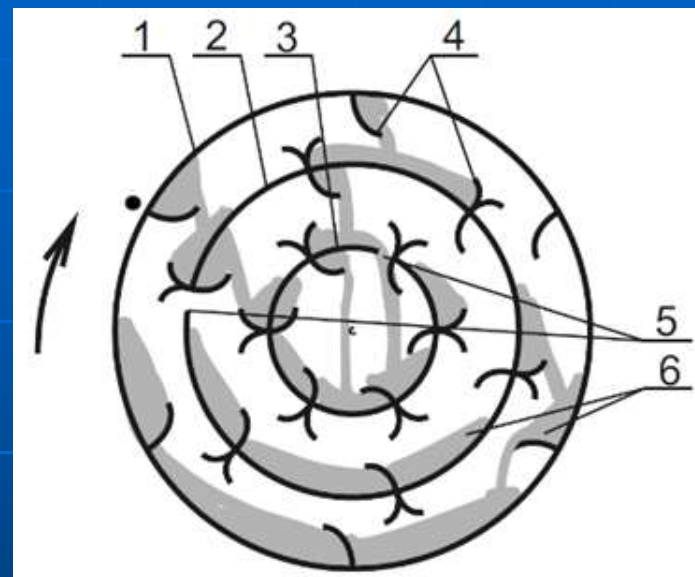


1 – корпус добытчика воды,
2 - гусеницы, 3 – лопата, 4 – УЗ излучатели, 5
– конденсатор, 6 – обезвоживаемый реголит;
7 - реголит

Принцип работы ультразвуковой барабанного устройства горизонтального типа



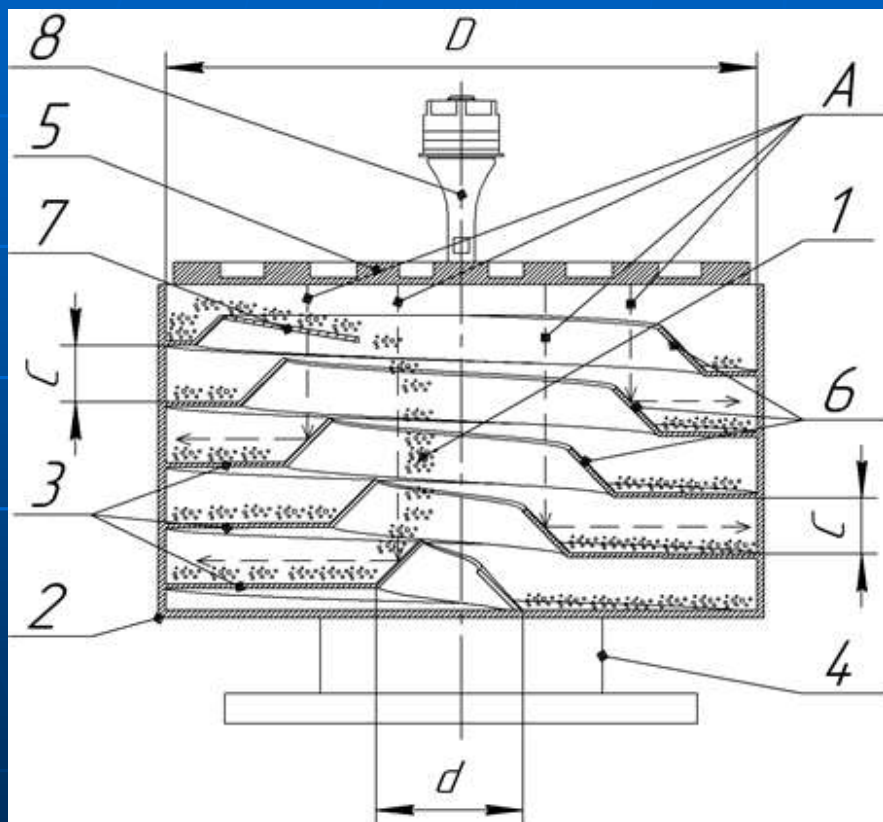
начальное положение



поворот барабана на 300 градусов

1 – барабан, 2, 3 – цилиндрические поверхности, 4 – лопасти,
5 – продольные отверстия, 6 – влажный материал

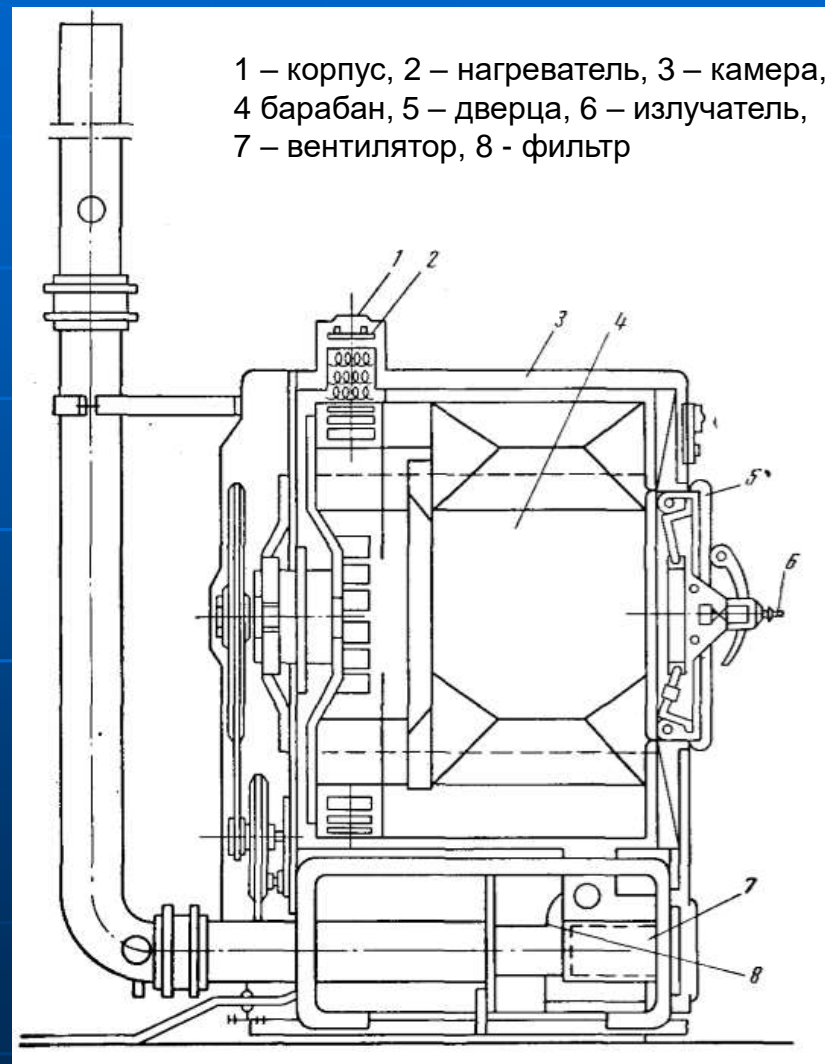
Ультразвуковое устройство вертикального типа



- 1 – влажный материал;
- 2 – цилиндрический барабан;
- 3 – спиральный лоток;
- 4 – вибропривод; 5 – ультразвуковой излучатель; 6 – отражатель ультразвуковых колебаний;
- 7 – верхний виток спирального лотка;
- 8 – пьезопреобразователь;
- A – максимальное и минимальное расстояния от излучателя до двух диаметрально расположенных участков спирального лотка;
- D – диаметр барабана;
- d – внутренний диаметр витков спирального лотка; C – расстояние между витками спирального лотка

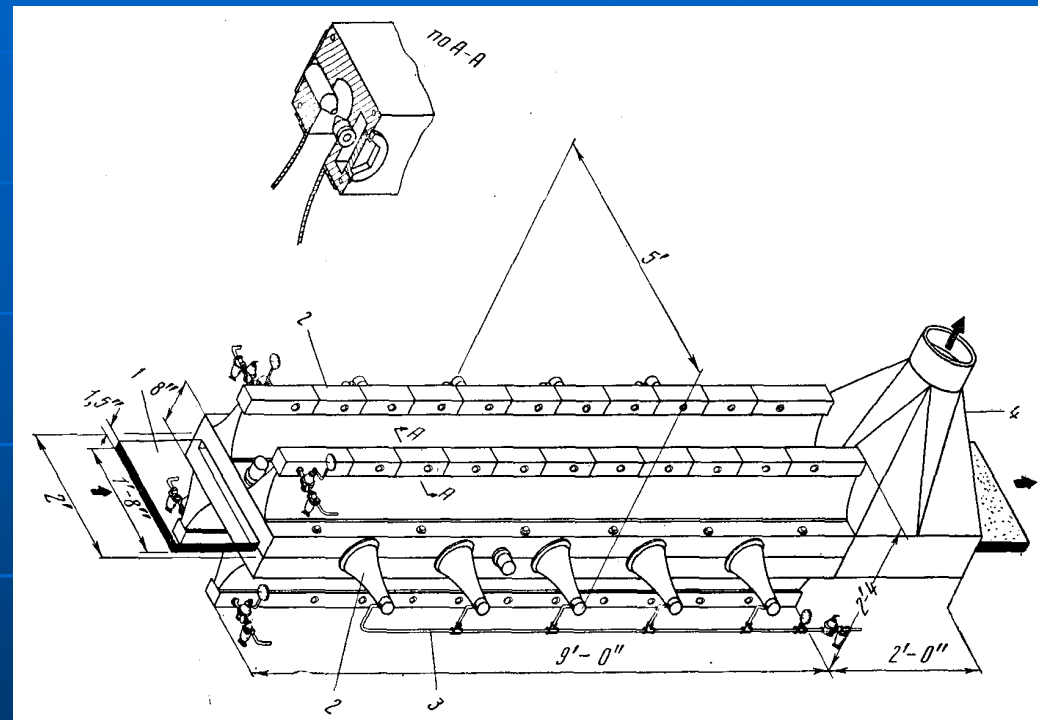
Конструкция барабанного устройства

- Барабанные УЗ устройства используются при выделении влаги из сыпучих материалов.
- Режим работы барабанных устройств – периодический.
- Влажный материал закладывается в барабан, где подвергается УЗ воздействию (в том числе и совместно с тепловым).
- Вращение барабана способствует равномерности воздействия колебаний на весь объем материала и выделению влаги.
- Влага из барабанного устройства удаляется вытяжным вентилятором
- УЗ излучение внутри барабанных устройств создается контактными и бесконтактными излучателями.



Конструкция туннельного устройства влаговыведения

- В отличие от барабанных устройств— туннельные являются аппаратами непрерывного действия.
- Влажный материал транспортером движется сквозь туннель, внутри которого создается интенсивное акустическое излучение.
- Туннельные сушилки применяются для удаления влаги из сыпучих материалов при контактных и бесконтактных воздействиях



1-высушиваемый материал, 2– излучатели, 3- система подачи воздуха, 4- система удавления влажного воздуха