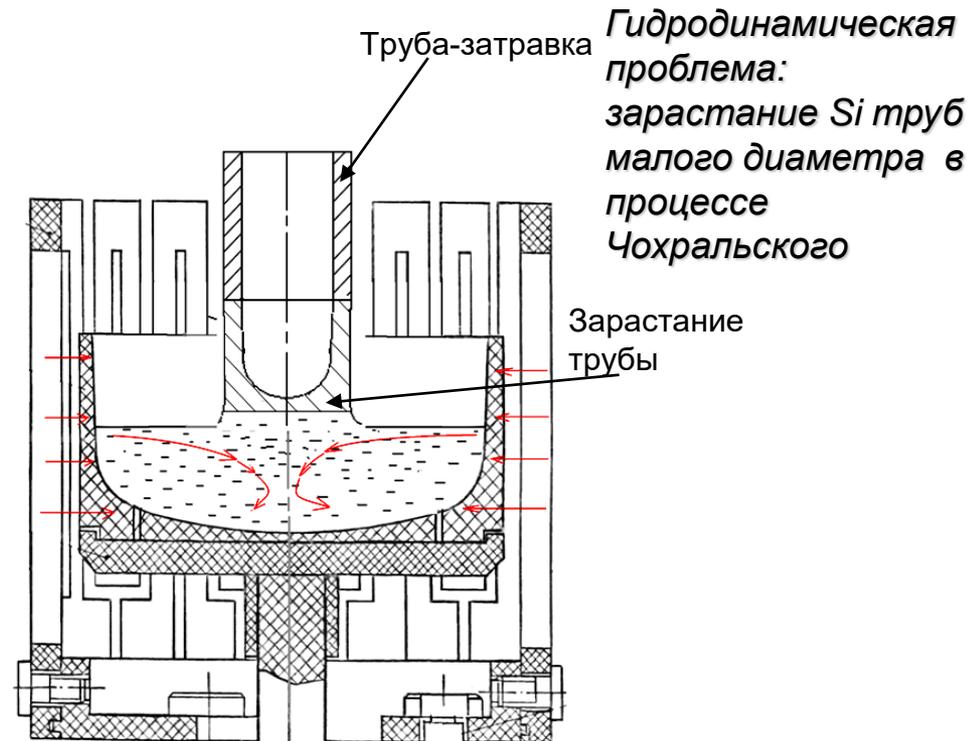
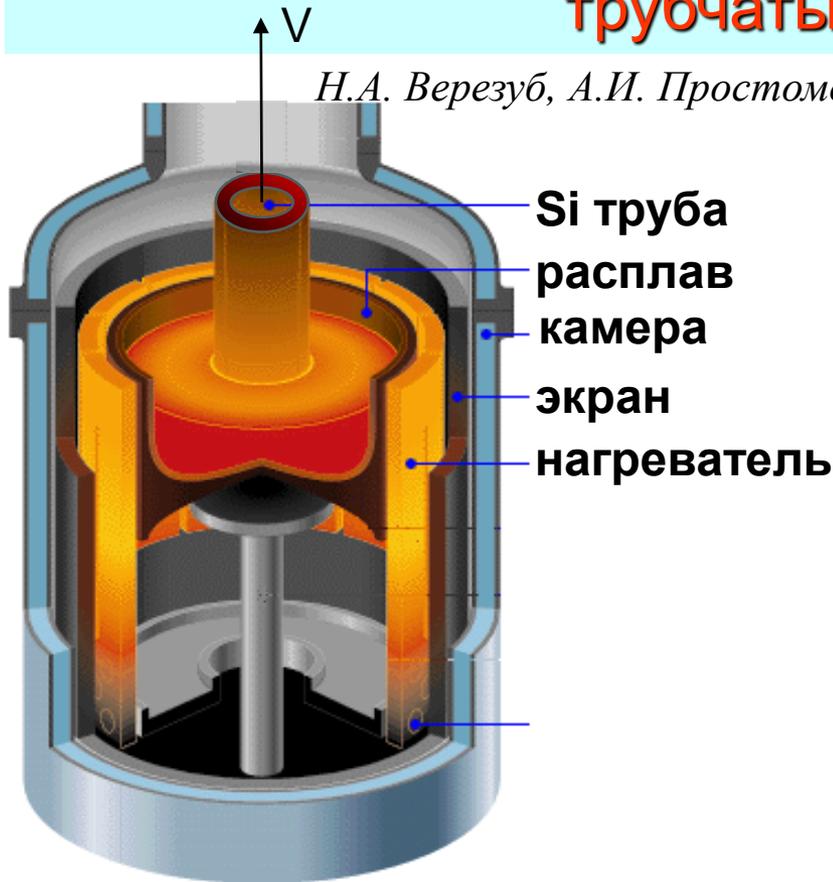


# Управление вихреобразованием при выращивании трубчатых кристаллов

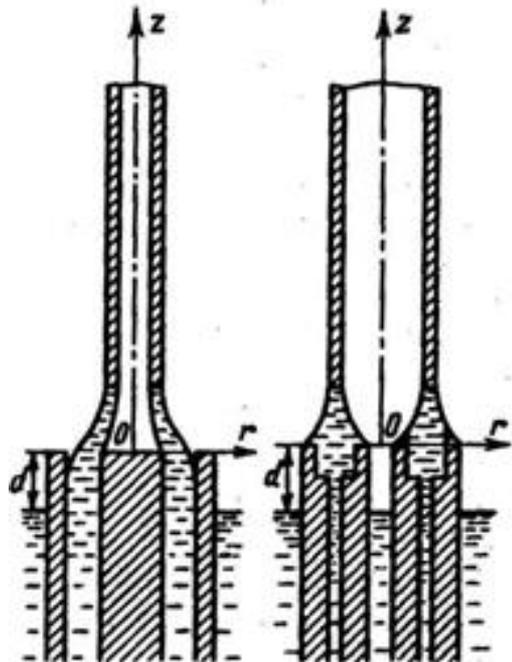
Н.А. Везуб, А.И. Простомолотов (ИПМех РАН)



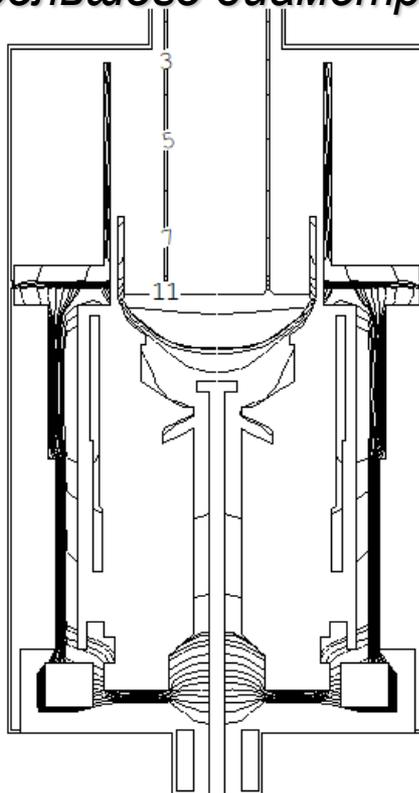
Доклад посвящен одной из задач гидромеханики при выращивании м/к трубок кремния малого диаметра методом Чохральского. Техническая актуальность задачи вызвана увеличением тока и напряжения при разработке новых приборов силовой кремниевой электроники (диоды, тиристоры, транзисторы). Ввиду того, что в традиционных планарных приборах увеличение тока до 100 А приводит к пробое прибора, поэтому перспективным является непланарный кремниевый прибор в виде тонкостенного полого цилиндра. Слева на слайде показаны компоненты теплового узла метода Чохральского (камера, нагреватель, экраны, тигель с расплавом), где происходит вытягивание со скоростью  $V$  трубки из расплава. Температура кристаллизации трубки 1683 К. Гидродинамическая проблема состоит в том, что первоначальная трубка, использованная в качестве затравки, с какого-то времени процесса начинает изнутри закристаллизовываться. Это иллюстрируется штриховкой в нижней части трубки на правом рисунке.

# Аналоги методов кристаллизации труб из расплава

Метод Степанова:  
использование фильер  
(заштрихованы)



Метод Чохральского для выращивания Si труб  
большого диаметра



Установка EKZ-1600 для выращивания Si труб  
большого диаметра. Изотермы [K]:  
3 – 883, 5- 1083, 7 – 1283, 9 – 1483, 11 – 1683.

Традиционным способом выращивания профилированных кристаллических тел является метод Степанова, в котором для объемного профилирования используются различные конструкции формообразователя. На рисунке слева показано, как выращивается труба из расплава с помощью одного и двух формообразователей. Однако методом Степанова крайне сложно добиться нужного кристаллографического совершенства трубчатых монокристаллов из-за их загрязнения формообразователем и из-за объемной неоднородности легирующих примесей, определяющих электрофизические параметры силовых приборов. Метод Чохральского является наиболее перспективным способом получения трубчатых монокристаллов. Его эффективное применение при выращивании труб большого диаметра (100 мм) для эпитаксиальных реакторов было продемонстрировано на предприятии ЭЛМА в Зеленограде. Справа на рисунке показана расчетная схема ростовой установки и выращенная кремниевая труба.

# Макет теплового узла для выращивания монокристаллических трубок кремния методом Чохральского в установке «Редмет-10»

1 – ростовая сборка  
(трубка, расплав кремния,  
кварцевый тигель, подставка),

2 – тепловой экран,

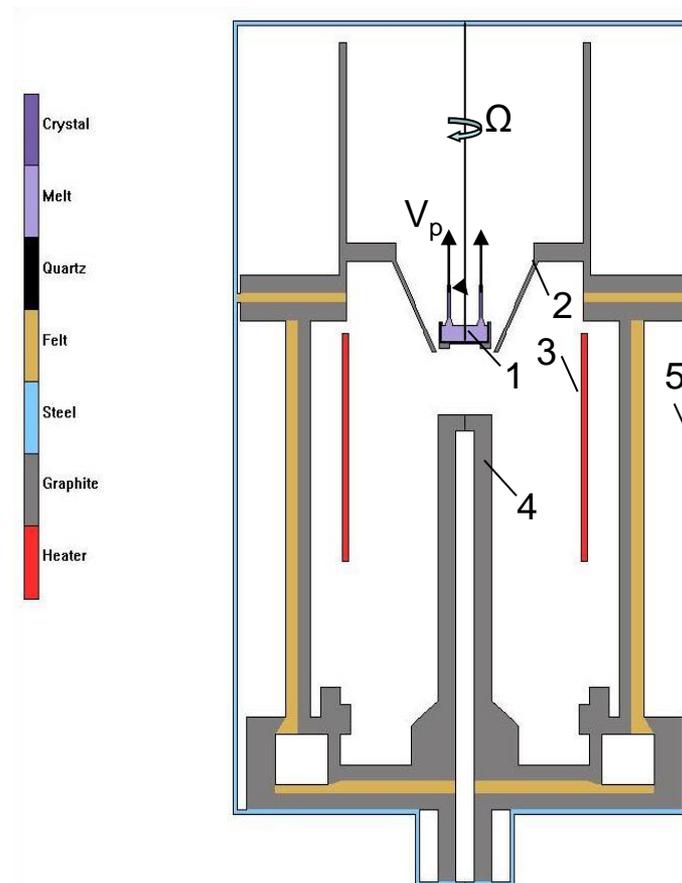
3 – нагреватель,

4 – нижний шток,

5 – стальной корпус.

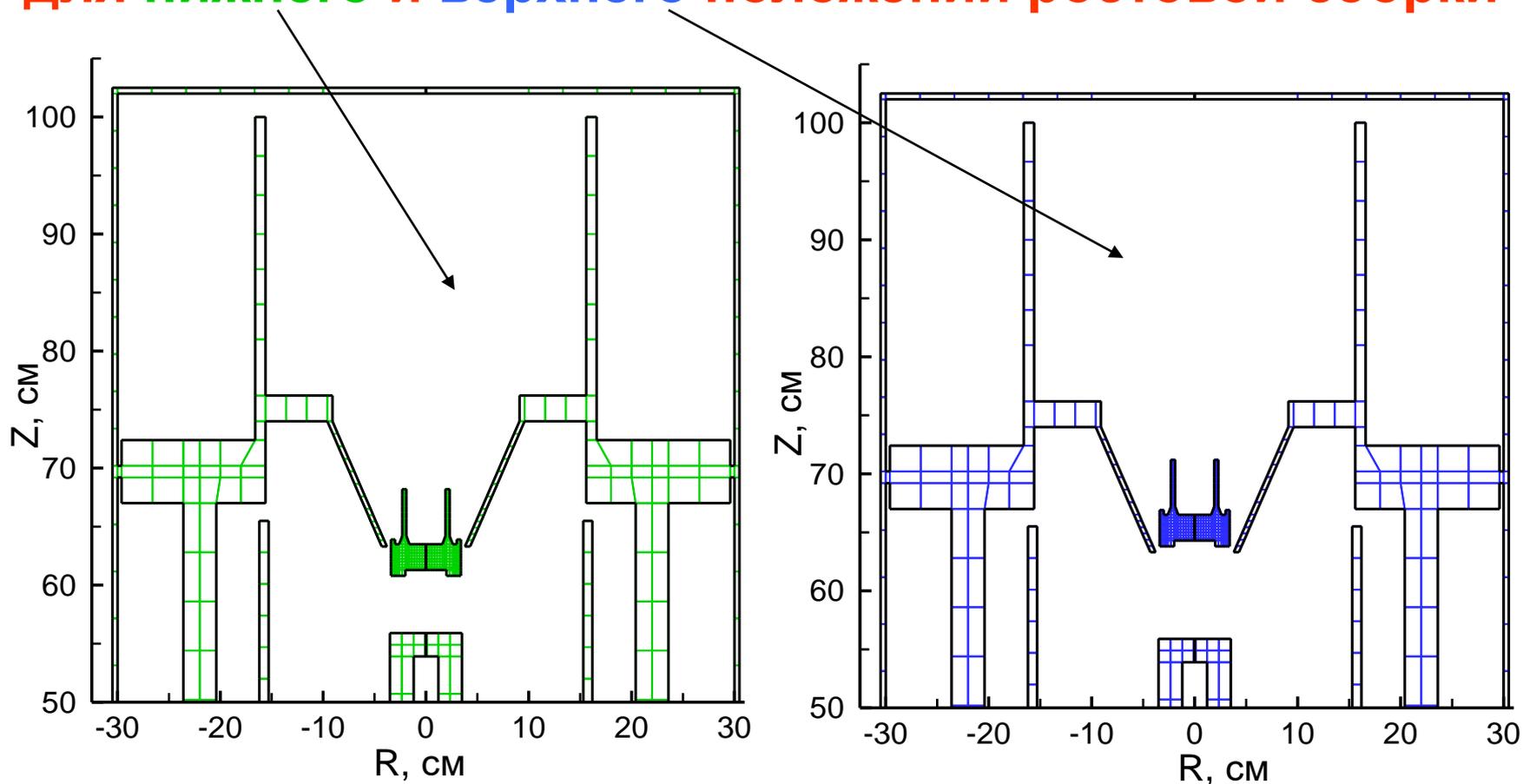
$\Omega$  – скорость вращения  
ростовой сборки,

$V_p$  – скорость вытягивания  
трубки.



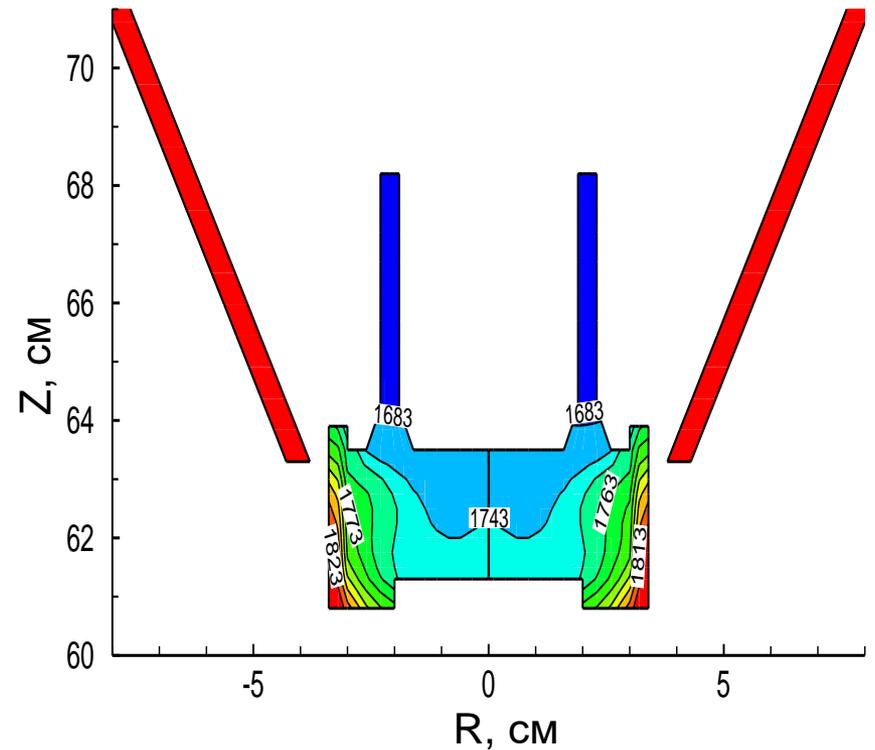
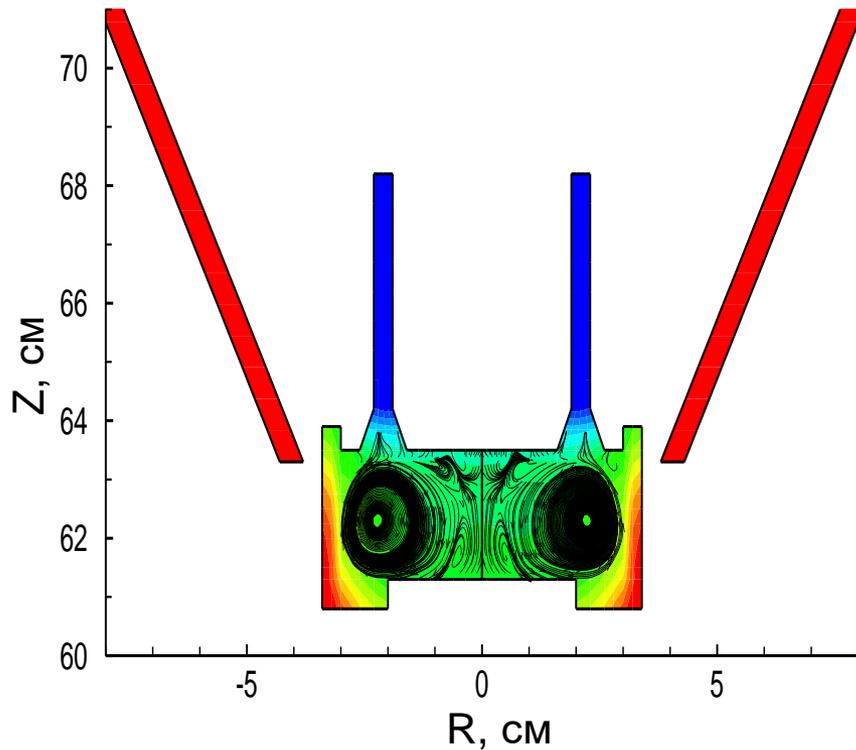
Трудность в разработке технологии выращивания трубок малого диаметра состояла в том, что необходимо было научиться управлять тепловым полем в расплаве с помощью стандартного резистивного нагревателя на промышленной установке Редмет-10, на которой выращивают сплошные слитки диаметром 75 мм из тигля диаметром 220 мм. В нашем случае для трубок диаметром 30-40 мм использовался существенно меньший тигель диаметром 60 мм с глубиной расплава 25 мм. На слайде показан модифицированный тепловой узел Редмет-10 для выращивания трубчатых монокристаллов малого диаметра.

# Расчетные схемы при параметрическом моделировании тепловых процессов в тепловом узле для **нижнего** и **верхнего** положений ростовой сборки



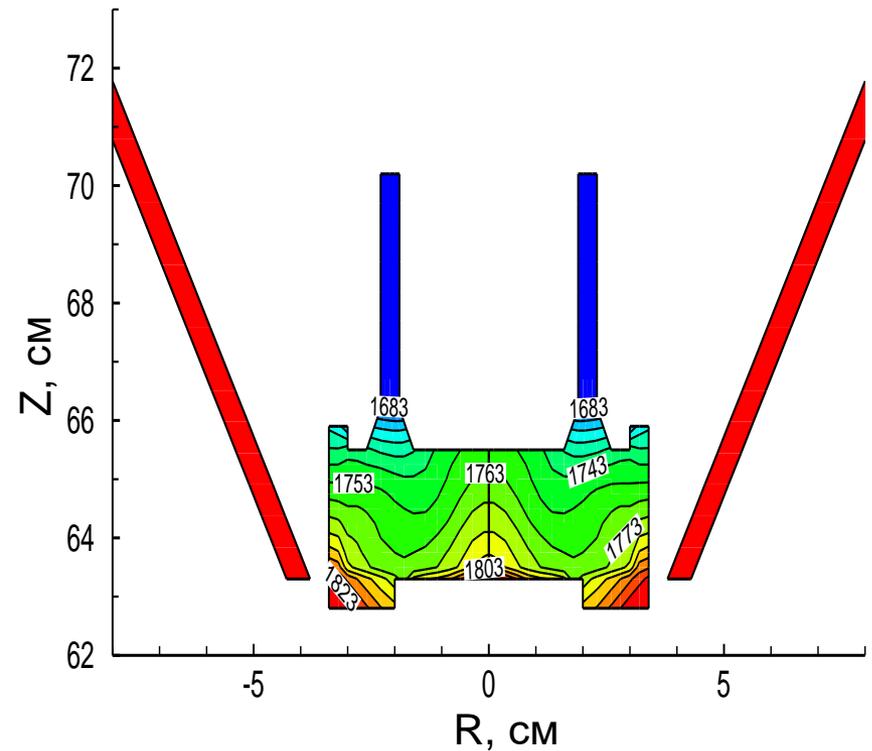
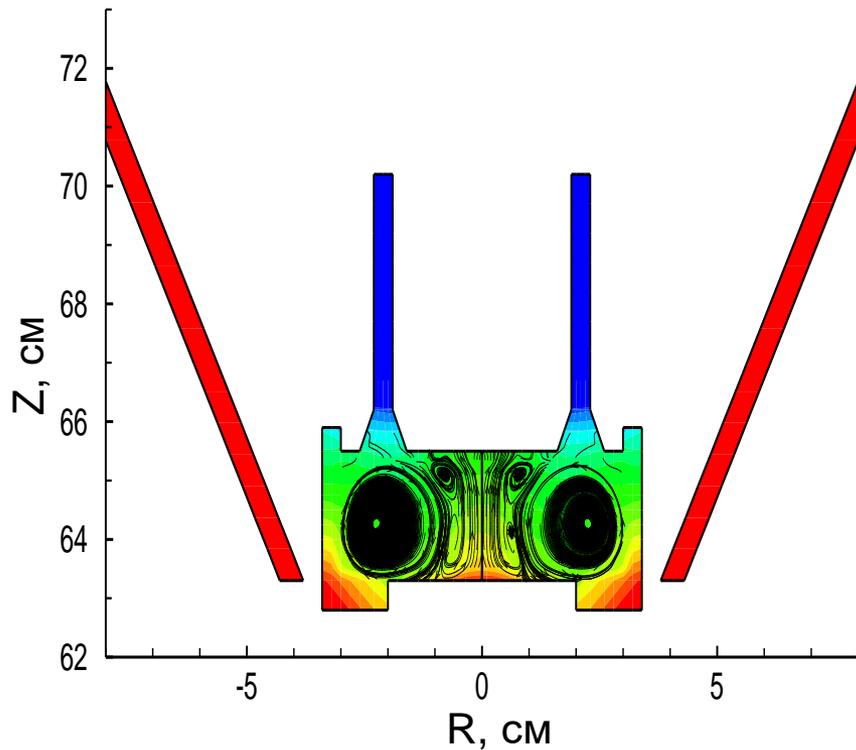
Управление тепловым полем проводилось с помощью изменения положения ростовой сборки (тигель, расплав, трубка) относительно бокового нагревателя. На этом слайде показаны два положения ростовой сборки – нижнее (слева) и верхнее (справа).

# Траектории течения расплава и изотермы [K] в ростовой сборке при ее нижнем положении



Согласно рисунку слева для нижнего положения тигля в расплаве преобладает боковой нагрев, в результате которого наиболее интенсивный вихрь находится вблизи боковой стенки тигля, а в центре тигля существует слабое вторичное течение. По изотермам, показанным на правом рисунке, можно заметить, что в центре тигля наблюдается недостаточный нагрев расплава с температурой несущественно превышающей температуру кристаллизации кремния 1683 К. Это означает, что такое положение тигля будет способствовать кристаллизации центра поверхности расплава.

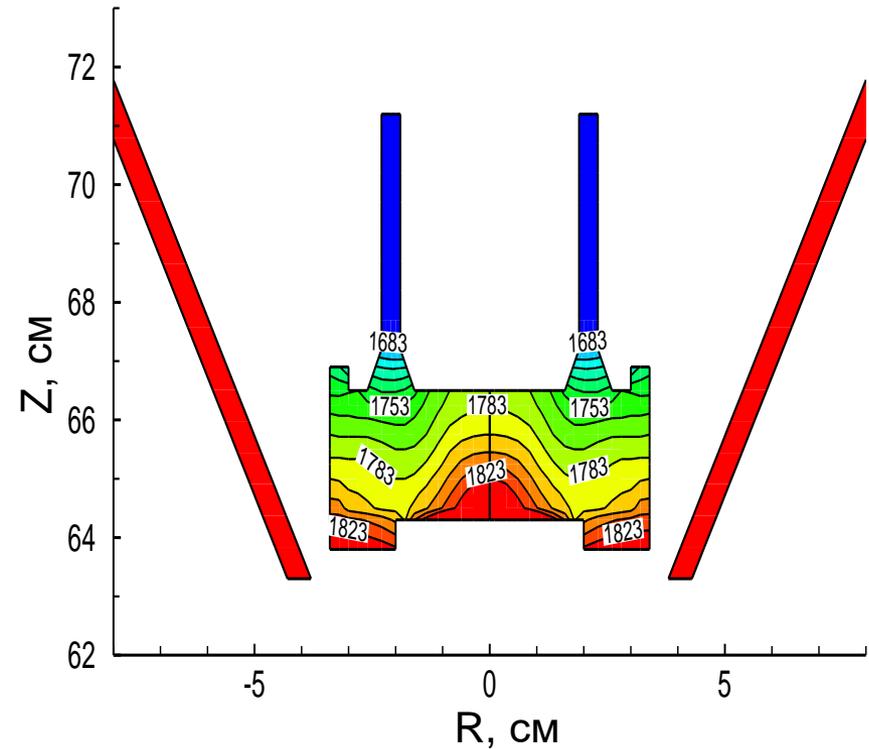
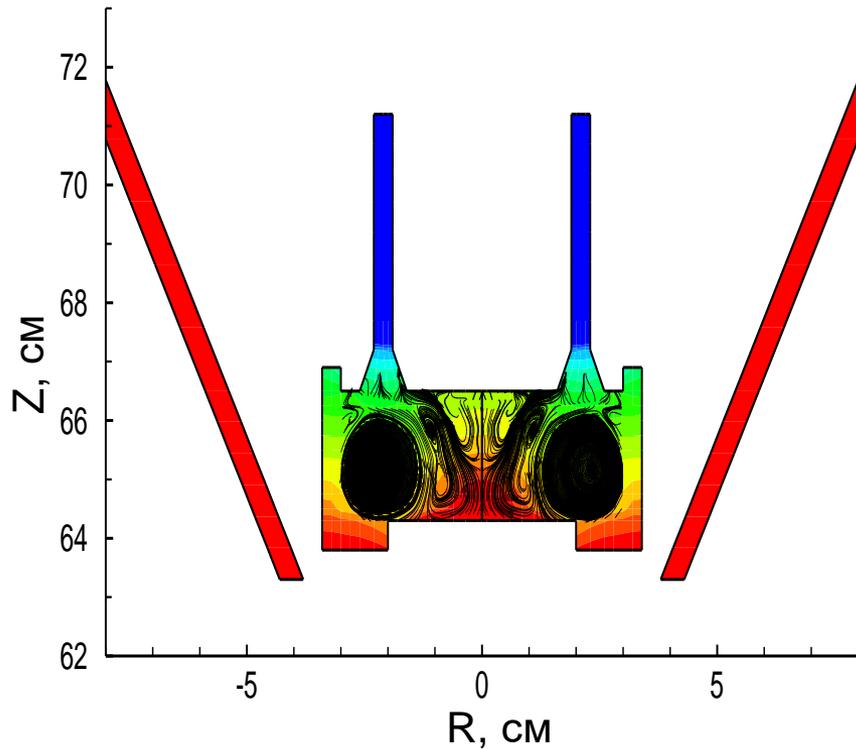
# Траектории течения расплава и изотермы [K] в ростовой сборке при ее среднем положении



**Изотерма  $T = 1683\text{K}$  соответствует фронту кристаллизации.**

Для промежуточного положения тигля, показанного на этом слайде, можно отметить возрастание температуры в центре тигля. Перегрев центра поверхности расплава относительно температуры кристаллизации свидетельствует о поддержании условий роста трубчатого кристалла.

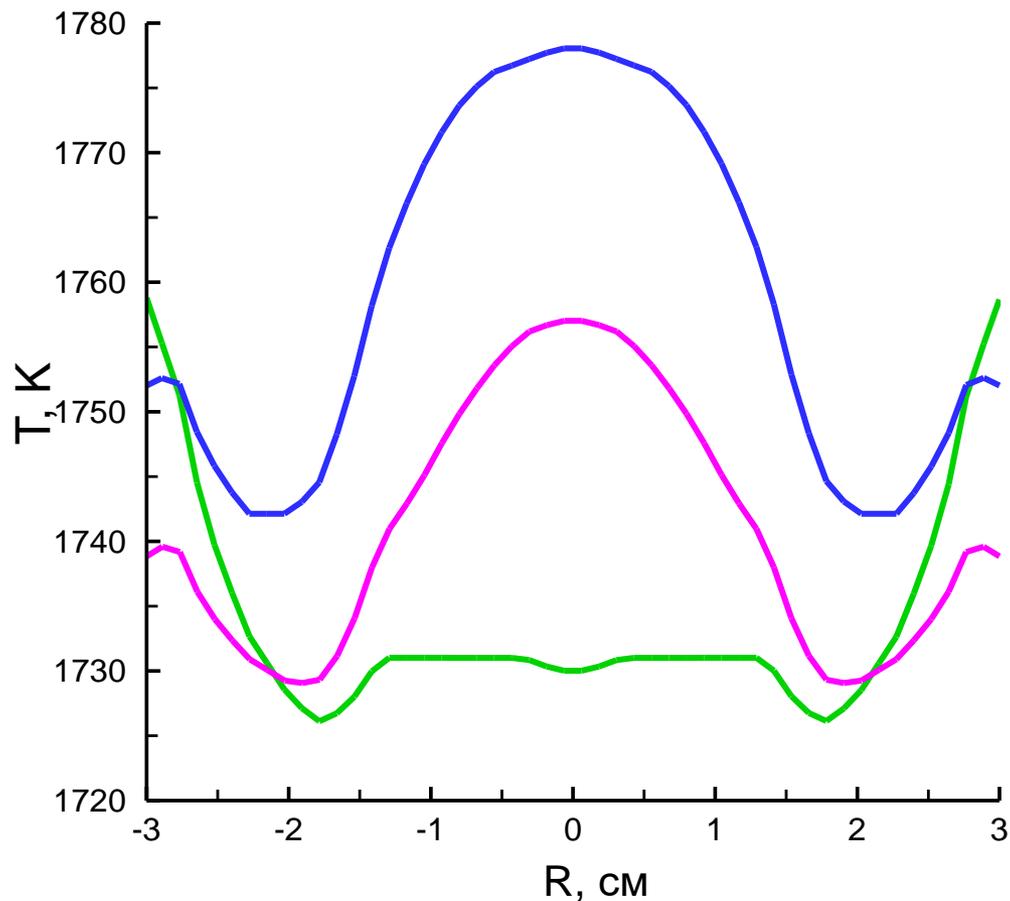
# Траектории течения расплава и изотермы [K] в ростовой сборке при ее **верхнем** положении



**Изотерма  $T = 1683\text{K}$  соответствует фронту кристаллизации.**

Наконец, при самом верхнем положении тигля реализуется его существенно донный нагрев, который создает центральное вихревое течение, которое значительно прогревает центр расплава и это соответствует наилучшим гидродинамическим условиям для получения трубчатых кристаллов.

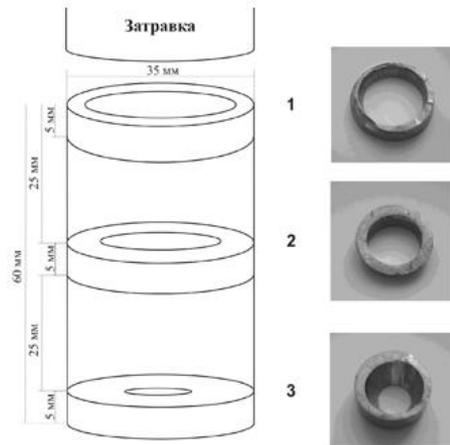
# Распределение температуры по поверхности расплава при 3-х положениях ростовой сборки: — нижнем, — среднем, — верхнем



На этом слайде показаны графики температуры по поверхности расплава при 3-х положениях ростовой сборки (нижнем, среднем, верхнем), которые подтверждают вывод о выборе наилучшего – верхнего положения тигля.

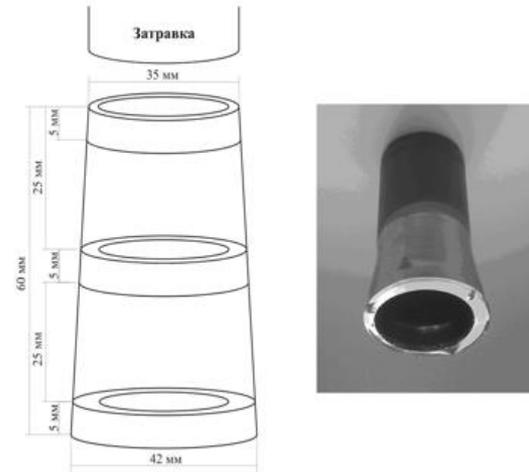
# Инновационное применение результатов для силовой электроники

а



← *Выращенные  
трубчатые  
Si кольца* →

б



в

*Непланарный выпрямительный диод с внутренней системой охлаждения и обычные планарные диоды*



Достоверность расчетных рекомендаций была подтверждена результатами выращивания трубчатых кристаллов и изготовлением непланарного диода на *кафедре физики твердого тела и электроники Северо-Осетинского государственного университета*. Слева на рисунке (а) показан разрезанный на кольца трубчатый кристалл диаметром 35 мм и длиной 60 мм. Можно заметить, что внутренний диаметр трубки уменьшается по мере увеличения её длины. Эта проблема решалась плавным снижением мощности нагревателя, но при сохранении внутреннего диаметра трубки происходило увеличение её внешнего диаметра с переходом к конусной форме, показанное на рисунке (б). С использованием выращенных кристаллов был изготовлен *первый отечественный непланарный диод* с рабочим *напряжением 100В и током 150 А* (в).

## ВЫВОДЫ

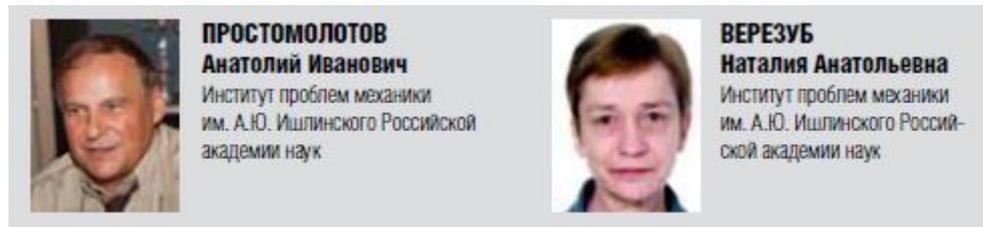
При выращивании из расплава монокристаллических трубок кремния в центральной области расплава (внутри трубы) необходимо создать более высокотемпературную зону, чем под её стенками. Это гарантирует от отвердивания расплава в отверстии трубы.

При малом диаметре трубы (35 – 40 мм) поддержание требуемого радиального градиента температур вызывает значительные затруднения.

Обеспечить выращивание трубы можно большим нагревом дна тигля. В условиях применения одного стандартного бокового нагревателя для этого требуется надлежащий выбор положения тигля относительно нагревателя.

Исследование гидродинамики в расплаве кремния позволило рекомендовать необходимые условия выращивания трубок кремния малого диаметра.

Более подробно можно ознакомиться с данным материалом в недавно вышедшей нашей монографии, размещенной на сайте ИПМех РАН.



<https://ipmnet.ru/>

Спасибо за внимание !