

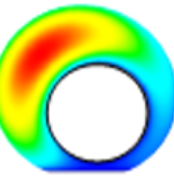
Программ **SigmaFlow** — задачи 2021

Гаврилов А.А., Дектерёв А.А

**Институт Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе
Красноярский филиал**



SigmaFlow



Модели

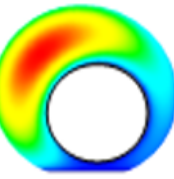
- турбулентность (RANS, PANS, RANS/LES, LES);
- неньютоновские жидкости;
- химические реакции в потоке , горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- конвективный, радиационный теплообмен, теплопроводность;
- движение дисперсной фазы в потоке (Лагранж, Эйлер);
- процессы с фазовыми переходами (кавитация, кристаллизация);
- течения со свободной поверхностью (VOF);
- течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами

Метод

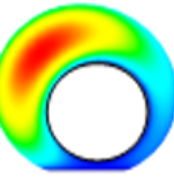
- **Метод контрольного объема** для неструктурированной сетки;
- **SIMPLE** подобный метод для связи полей давления и скорости;
- Совмещённые сетки с монотонизацией **Rchi-Чоу**;
- Нестационарные слагаемые – неявный трёхслойный метод, метод Кранка–Николсона;
- Аппроксимация конвективных потоков – **CDS, High-order CDS, QUICK, TVD ...**;
- Решение системы алгебраических уравнений: **BiCGStab, AMG**
- **Распараллеливание** – разбиение на подобласти (MeTiS), MPI



SigmaFlow – 2021



- Развитие моделей течения **неньютоновских упруго-вязкопластических сред**,
моделирование турбулентных течений неньютоновских сред
- Специализированная версия для моделирования **течений в моделях керна**,
моделирование двухфазных течений в пористых средах
- Развитие программы для моделирования **аэродинамики городской застройки** и распространения экологически вредных выбросов
- Решение задачи защиты дорог от **занесения снегом**

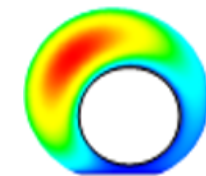


SigmaFlow – 2021

- Развитие моделей течения **неньютоновских упруго-вязкопластических сред**,
моделирование турбулентных течений неньютоновских сред
- Специализированная версия для моделирования **течений в моделях керна**,
моделирование двухфазных течений в пористых средах
- Развитие программы для моделирования **аэродинамики городской застройки** и распространения экологически вредных выбросов
- Решение задачи защиты дорог от **занесения снегом**



Моделирование течений эласто-вязко-пластических жидкостей (EVP)

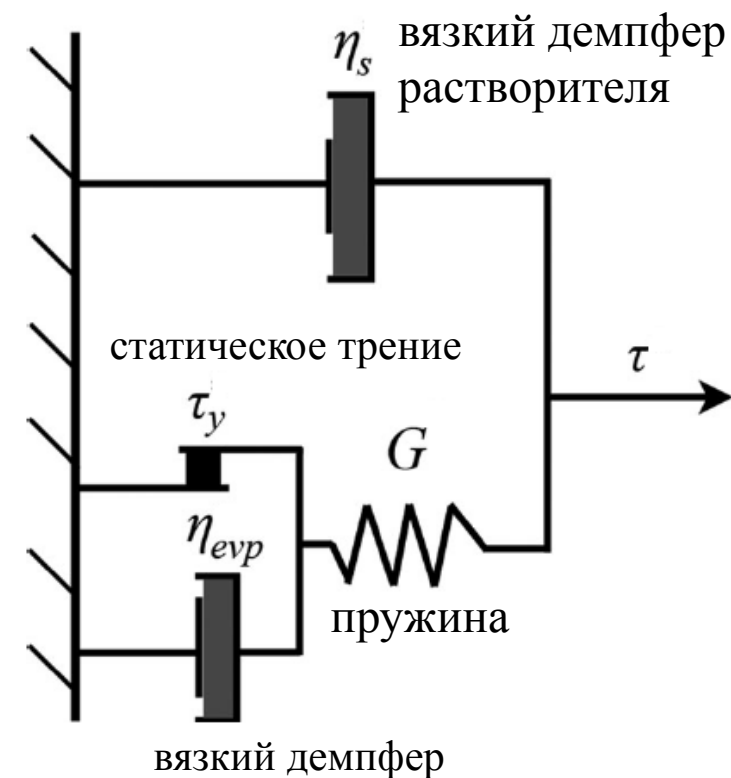


Сочетание трёх реологических свойств:

пластичность (наличие условия текучести),
упругость (энергия упругих деформаций),
вязкое трения

Особенности течений

- релаксация и перенос напряжений;
- анизотропия напряжений, ненулевая разность нормальных напряжений;
- неньютоновская вязкость при растяжении;
- области твердого упругого тела в потоке.

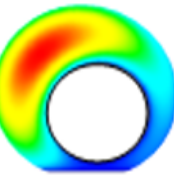


Цель работы:

определение характера турбулентного течения и создание базы данных DNS для разработки и валидации RANS модели турбулентности



Модель движения эласто-вязко-пластических сред



The liquid flow is governed by the continuity and momentum equations for incompressible fluid:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = 2\eta_s \mathbf{D} \quad \mathbf{D} = 1/2(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$$

\mathbf{D} is the tensor of the deformation rate
 η_s is the solvent viscosity.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_s + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_p$$

The extension of the **Herschel–Bulkley** modified model by **Saramito** (2007, 2009) can be expressed with a generic transport equation for the viscoelastic stress tensor:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\tau}_p + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \boldsymbol{\tau}_p}_{\text{convection}} = \underbrace{(\mathbf{L} \cdot \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_p \cdot \mathbf{L})}_{\text{deformation}} + G \left[\underbrace{2\mathbf{D}}_{\text{source}} - \underbrace{\frac{1}{\eta_p} f(\boldsymbol{\tau}_p) \boldsymbol{\tau}_p}_{\text{relaxation}} \right]$$

$$\mathbf{L} = \nabla \mathbf{u}^T - \xi \mathbf{D}$$

$$\frac{1}{\eta_p} = \max \left(0, \frac{|\boldsymbol{\tau}| - \tau_0}{k_v |\boldsymbol{\tau}|^n} \right)^{1/n}$$

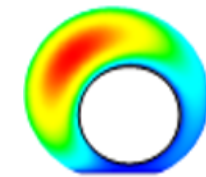
Rheological measurements

Viscoelastic properties: G is the shear modulus of elasticity, η_p is the effective polymeric viscosity, λ is the relaxation time $\lambda = \eta_p / G$

Herschel–Bulkley rheology: n is a power-law index, k_v is a the consistency parameter, τ_0 is a yield stress



Моделирование движения эласто-вязко-пластических сред



Сложности для моделирования:

- Отсутствие явной связи напряжений и скорости деформации, нет эффективной вязкости;

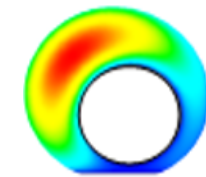
$$\boldsymbol{\tau} \neq 2\eta\mathbf{D}$$

- отсутствие диффузии упругих напряжений;
- неограниченный рост вязкости при растяжении;
- численное решение может не удовлетворять эволюционному свойству определяющего уравнения для упругих напряжений.

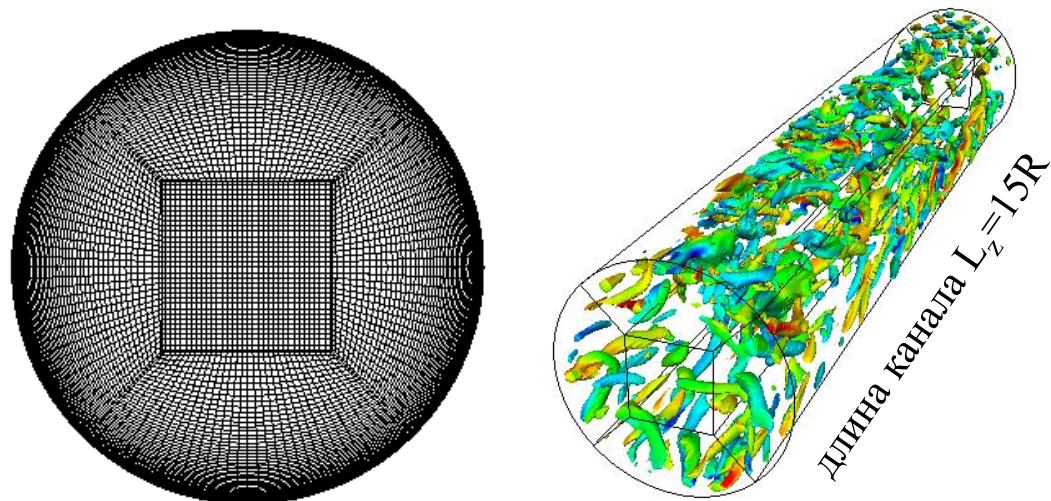
$$\det\left(\frac{1}{G}\boldsymbol{\tau}_p + \mathbf{I}\right) > 0$$



Прямое численное моделирование турбулентных течений неньютоновских сред



Серия расчётов турбулентного течения в трубе



длина канала $L_z = 15R$

Детализация сетки

$$\Delta r^+ = \text{от } 0.25 \text{ до } 5$$

$$\Delta(r\theta)^+ \text{ у стенки} = 8$$

$$\Delta z^+ = 10$$

$$\Delta t^+ = 0.3$$

число ячеек 11×10^6

осреднение $T = 200 R/U_b$ $\bar{A} = \langle A \rangle = \langle A \rangle_{time,r,\phi}$

число Рейнольдса

$$Re = \frac{2R\rho U}{\eta_0} = 10\,000$$

число Бингама

$$Bn = \frac{\tau_0}{\eta_0 \gamma} = 0, 1, 2, 4$$

число Вайссенберга

$$Wi = \lambda \gamma = \frac{\eta_p}{G} \gamma = 0, 0.125, 0.25, 0.5$$

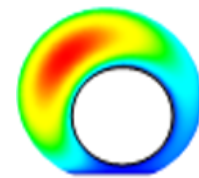
отношение вязкостей

$$\beta = \eta_s / (\eta_p + \eta_s) = \eta_s / \eta_0 = 0.25$$

Режим малого снижения сопротивления (LDR) < 20%

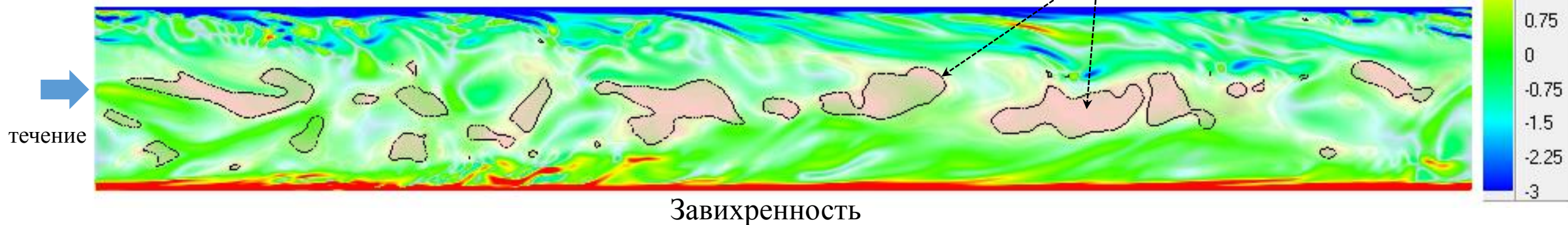


Прямое численное моделирование турбулентных течений неньютоновских сред



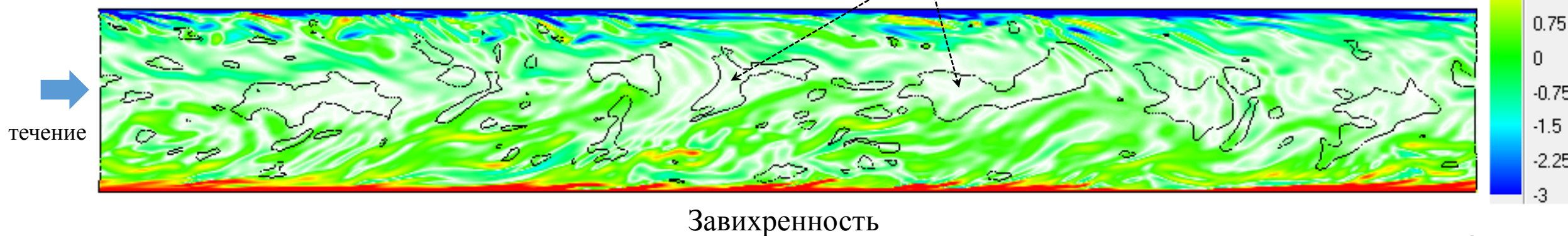
Жидкость Бингама $Bn=4$ $Wi=0$

Недеформируемое твёрдое тело



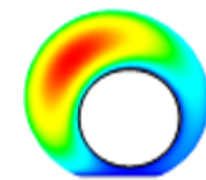
EVP $Bn=4$ $Wi=0.5$

Упругое твёрдое тело (контуры)

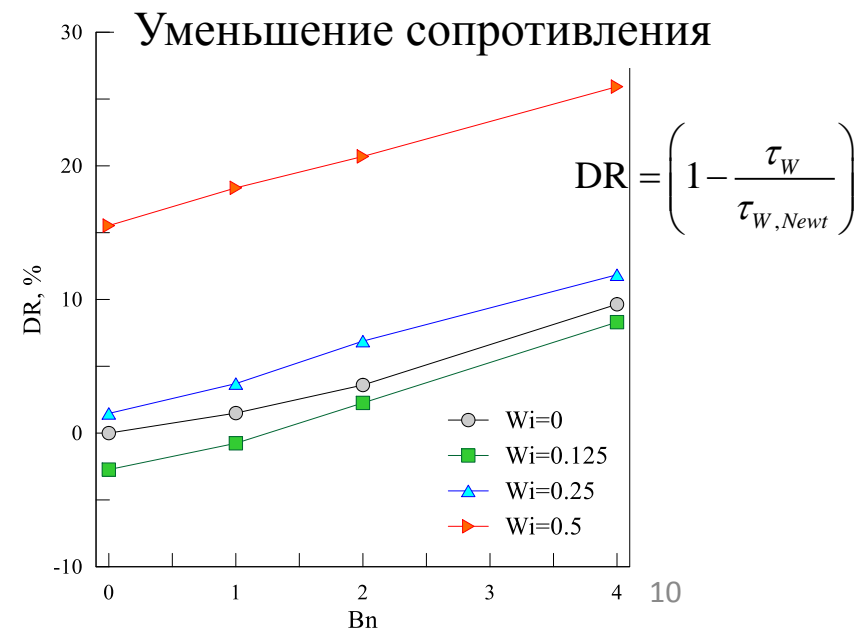
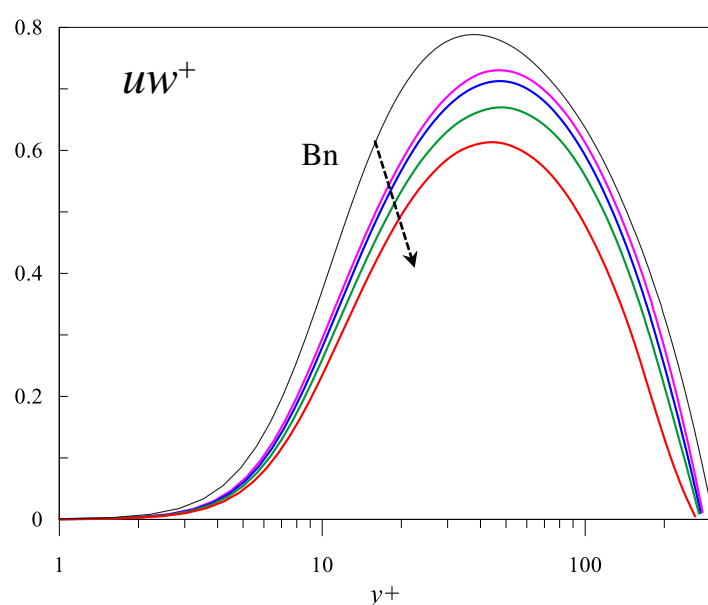
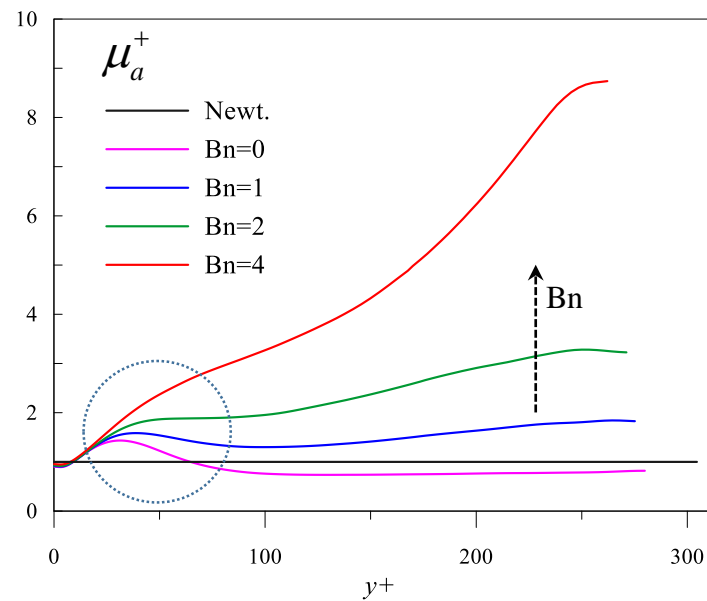
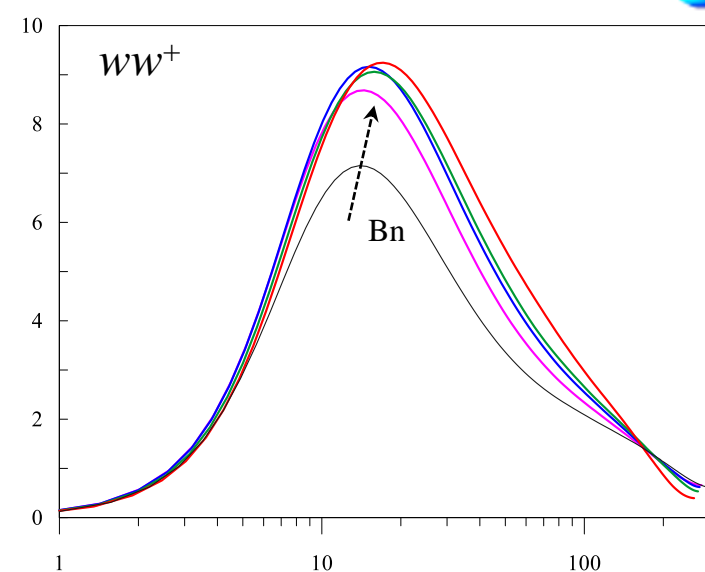
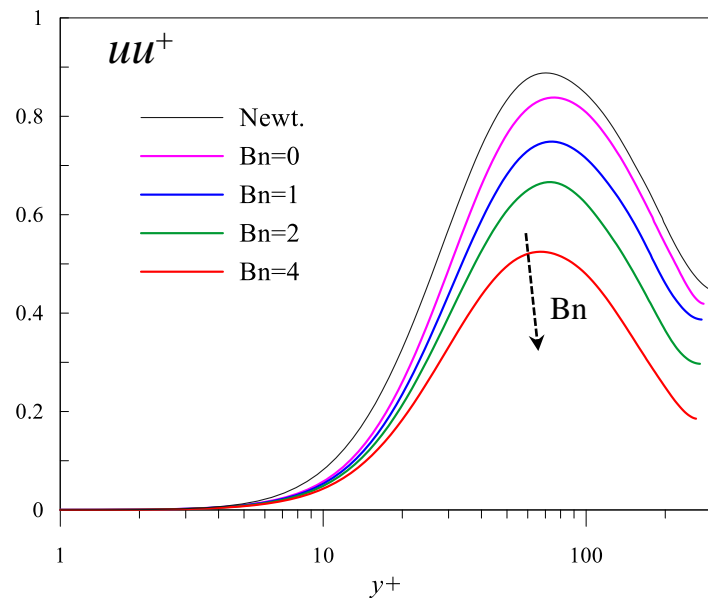
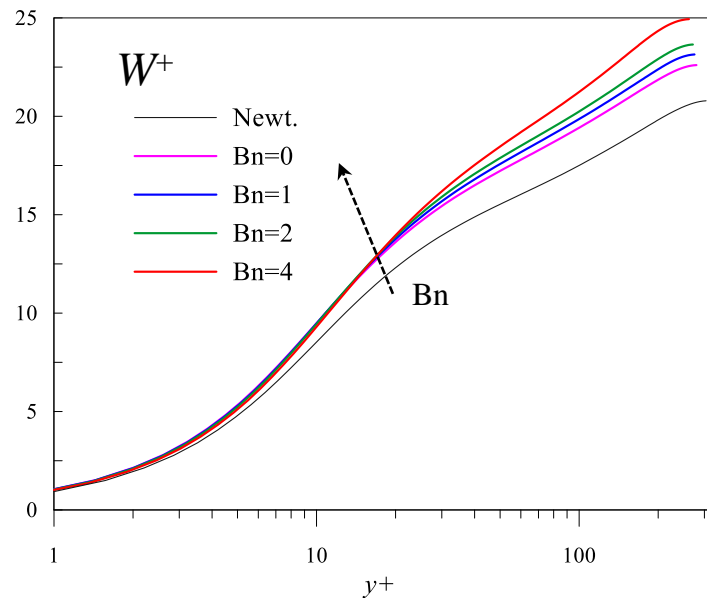




Прямое численное моделирование турбулентных течений неньютоновских сред

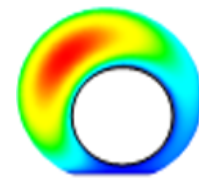


EVP $Wi = 0.5$

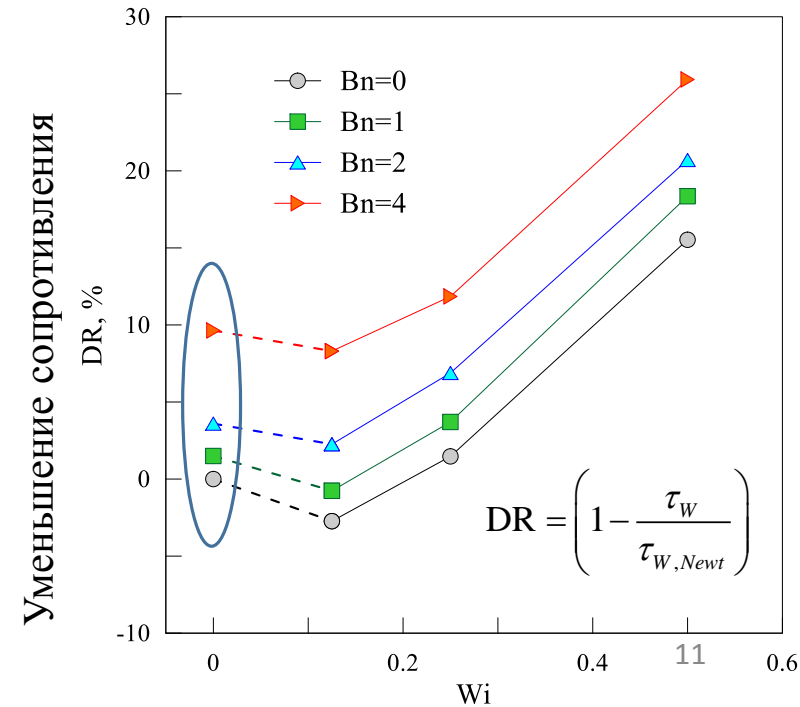
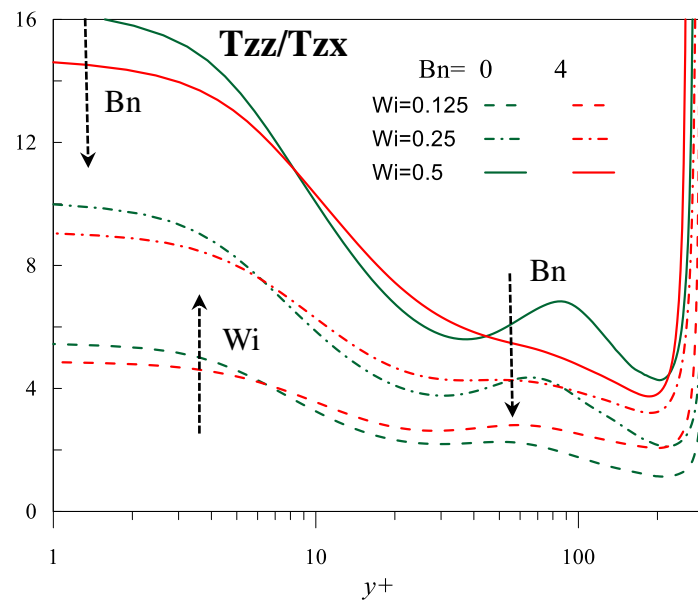
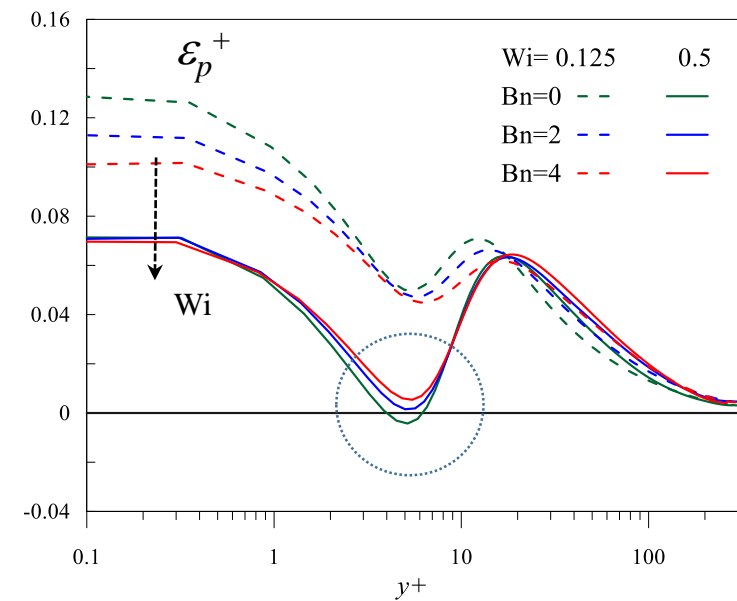
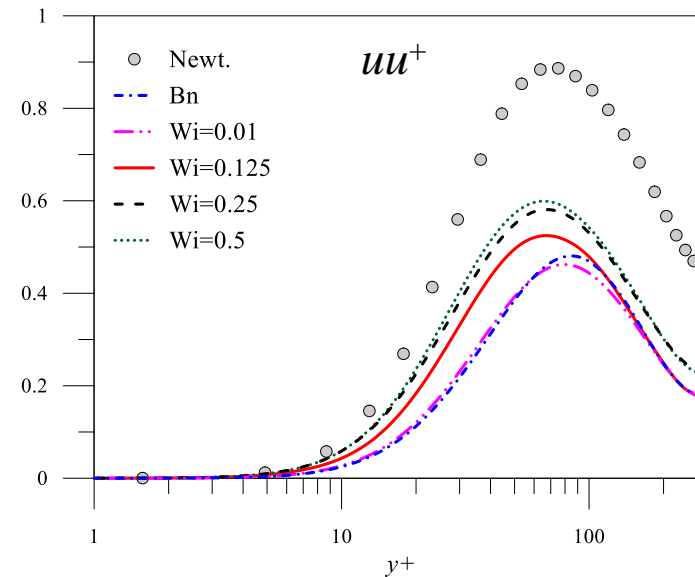
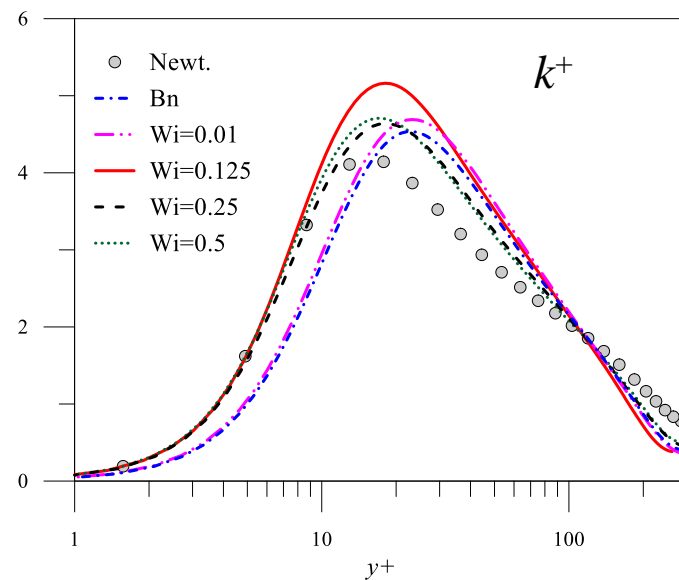
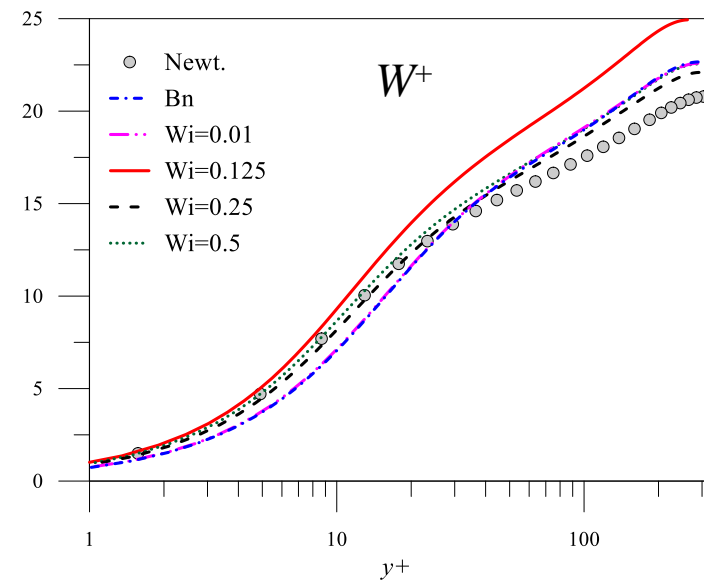




Прямое численное моделирование турбулентных течений неньютоновских сред

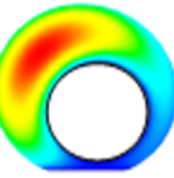


EVP Bn = 4



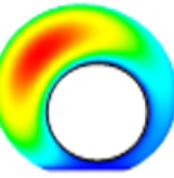


Прямое численное моделирование турбулентных течений неньютоновских сред



Промежуточные выводы:

- Понижение сопротивления с увеличением Bn и Wi сопровождается повышением анизотропии турбулентности.
- Понижение сопротивления с увеличением предела текучести (Bn) связано с повышением эффективной сдвиговой вязкости в турбулентном подслое и подавлением интенсивности генерации турбулентности.
- С увеличением Wi (в области LDR) наблюдается существенное снижение вязкоупругой скорости диссипации в вязком и буферном подслоях.
- ...
- Собранные данные могут быть использованы для создания RANS модели турбулентных течений EVP сред.

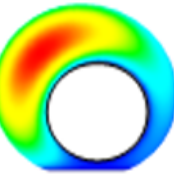


SigmaFlow – 2021

- Развитие моделей течения **неньютоновских упруго-вязкопластических сред**,
моделирование турбулентных течений неньютоновских сред
- **Специализированная версия для моделирования течений в моделях керна,**
моделирование двухфазных течений в пористых средах
- Развитие программы для моделирования **аэродинамики городской застройки** и распространения экологически вредных выбросов
- Решение задачи защиты дорог от **занесения снегом**



Одно и двухфазные течения в моделях керна



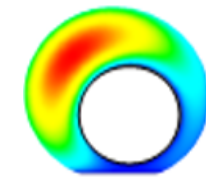
Специализированная версия *SigmaFlow* для моделирования течений в моделях керна. Керна представлен воксельной моделью.

Пакет программ (генератор сетки, CFD решатель, пост-процессор) предназначен для моделирования

- 1) течения жидкости в пористом пространстве с неоднородным распределением пористости;
- 2) нестационарного процесса вытеснения одной жидкости другой жидкостью в модели керна:
 - 2.1) с разрешением межфазной границы;
 - 2.2) с параметризацией контактной границы (течение в пористой среде).



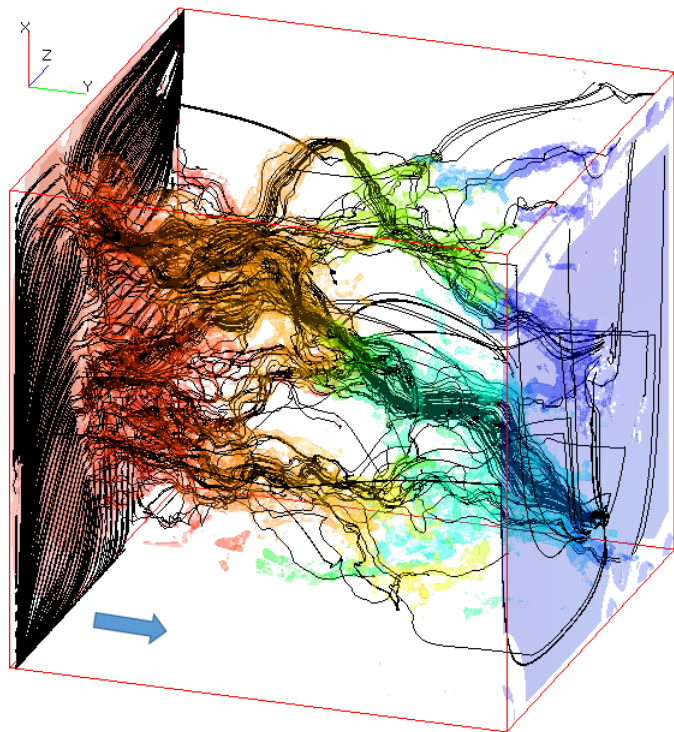
Однофазное течения в пористой среде



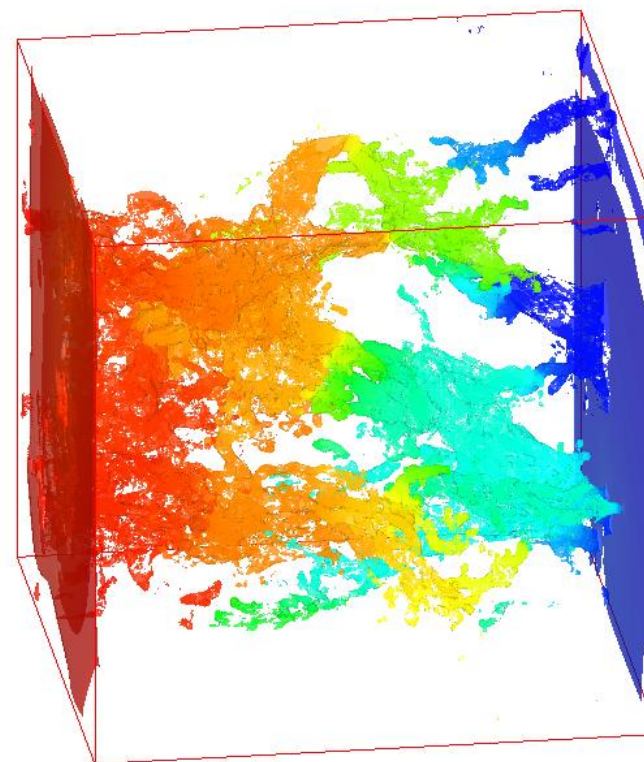
Область течения может включать течение в свободном пространстве и течение в пористой среде. Течение жидкости в пористой среде описывается уравнениями **Навье-Стокса-Бринкмана** с постоянными значениями динамической вязкости и плотности:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{S}) - \frac{\mu}{k} \mathbf{u}$$

← Локальная проницаемость



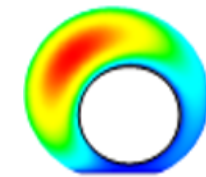
изоповерхность модуля скорости, окрашенная локальным значением давления и траектории частиц жидкости



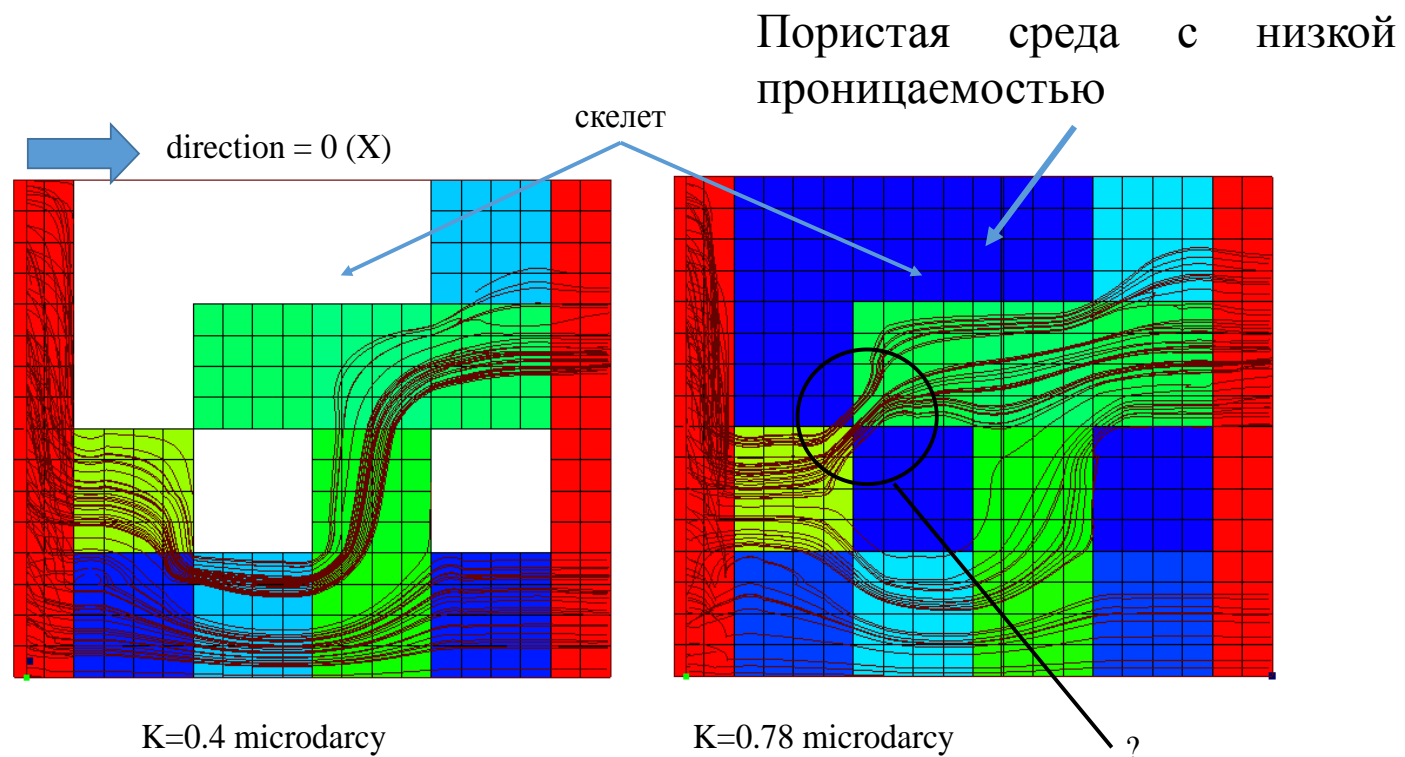
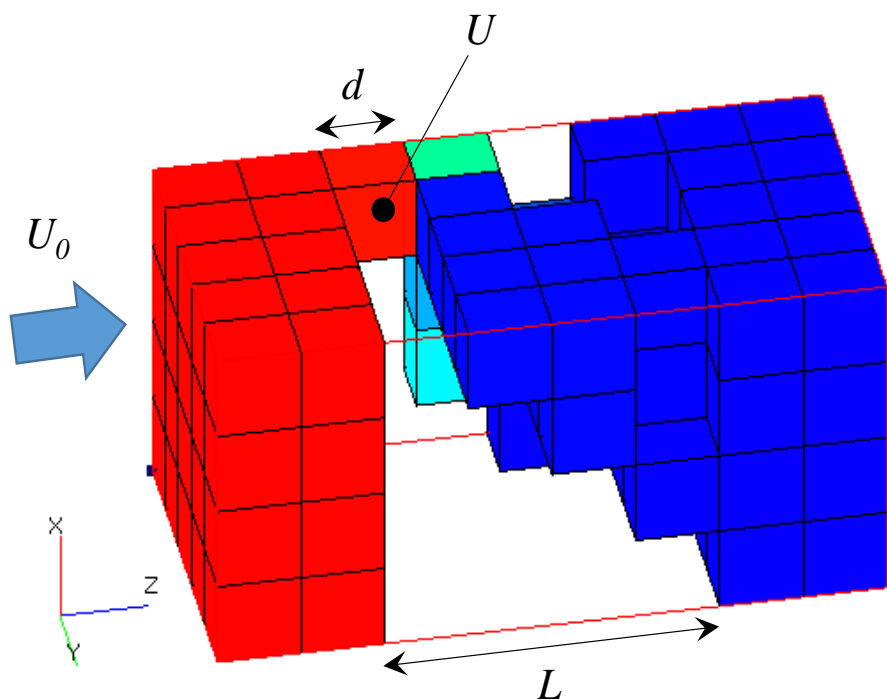
изоповерхность модуля скорости $10 U$



Однофазное течения в пористой среде

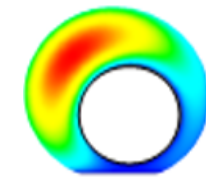


Разрывное распределение силы требует специального, взвешенного способа интерполяции скорости и давления на грани контрольных объёмов.





Однофазное течения в пористой среде. Алгоритм



$$\rho \frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}^{n-1}}{\Delta t} = S(\mathbf{v}) \mathbf{v} - \nabla p$$



$$A\mathbf{v} = H - \nabla p$$



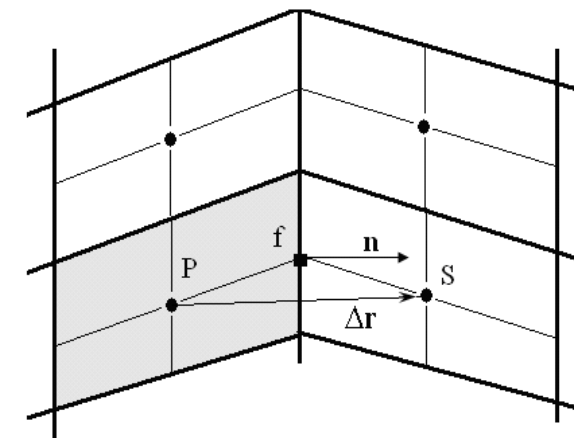
$$C\mathbf{v} + B\nabla p = H$$

$$a = \frac{\mu}{\Delta^2} + \frac{\rho}{\Delta t} + \frac{\mu}{K}$$

Интерполяция скорости на грань контрольного объема принимает формулу с поправкой Rhie-Chow

$$\mathbf{v}_f = C_f^{-1} (\overline{C\mathbf{v}})_f + C_f^{-1} \left[(\overline{B\nabla p})_f - (B\nabla p)_f \right]$$

интерполяция на грань из центров смежных ячеек $\bar{\phi}_f = \frac{1}{2}(\phi_P + \phi_S)$



Классический вариант

$$C = \mathbf{I} \quad B = A^{-1}$$

$$\mathbf{v}_f = \frac{1}{2}(\mathbf{v}_P + \mathbf{v}_S) + \left[\frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{a} \nabla p \right)_P + \left(\frac{1}{a} \nabla p \right)_S \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{a_P} + \frac{1}{a_S} \right) (\nabla p)_f \right]$$

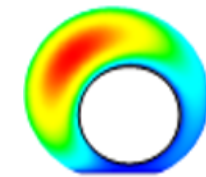
Взвешенный вариант

$$C = A \quad B = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{v}_f = \frac{(a\mathbf{v})_P + (a\mathbf{v})_S}{(a_P + a_S)} + \frac{1}{(a_P + a_S)/2} \left[\overline{\nabla p}_f - \nabla p_f \right]$$



Двухфазное течения с разрешением контактной границы



Модель VOF (Volume of fluid method) описывает нестационарный процесс течения несмешивающихся жидкостей в поровом пространстве с разрешением межфазной границы на основе модели Навь-Стокса

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{S}) + (\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + (\mathbf{f}_c - \nabla p_c)$$

p_c – капиллярное давление,

σ – коэффициент поверхностного натяжения

Сила поверхностного натяжения $\mathbf{f}_c = \sigma k \mathbf{n}_s \delta_s \quad k = \nabla \cdot \mathbf{n}_s \quad \mathbf{n}_s = \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|}$

Уравнение для капиллярного давления $\nabla \cdot \nabla p_c = \nabla \cdot \mathbf{f}_c$

Уравнение переноса доли жидкости $\frac{\partial}{\partial t} \alpha + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha) = 0$

Сложности для моделирования:

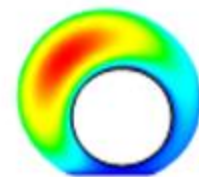
$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \square 10^{-5} \div 10^{-8}$$

- Размазывание контактной границы – метод с антидиффузией, «сжимающей» границу;
- Паразитные токи у контактной границы при малых капиллярных числах – выделение капиллярного давления, введение искусственной вязкости на границе раздела;

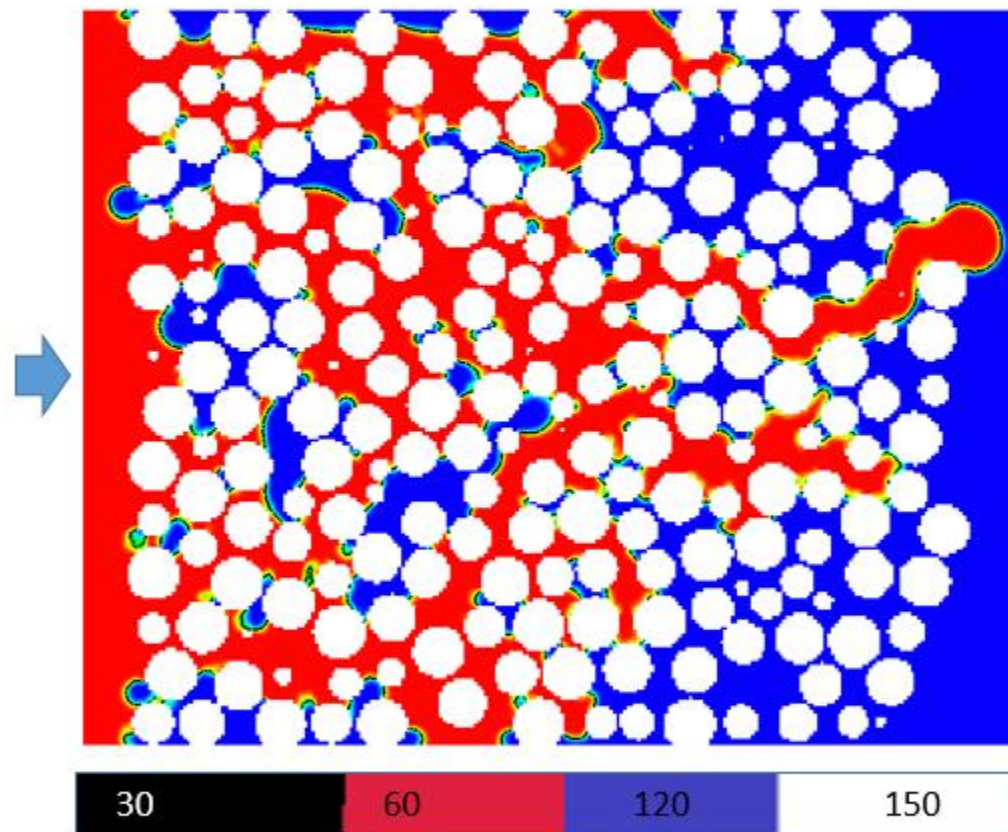
- Сильное ограничение временного шага $\Delta t \leq C_t \max(\Delta t_\mu, \Delta t_\sigma) \quad \Delta t_\mu = \frac{\mu \Delta}{\sigma} \quad \Delta t_\sigma = \sqrt{\frac{\rho \Delta^3}{\sigma}}$



Двухфазное течения с разрешением контактной границы

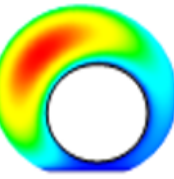


Плоское течение с распределенным контактным углом





Двухфазное течение в пористой среде



Модель двухфазной смеси описывает нестационарное течение жидкостей в пористом пространстве без разрешения межфазной границы. Двухфазная среда рассматривается как одножидкостная среда, состоящая из двух компонент и имеет непрерывное распределение плотности и вязкости. Область течения может включать течение в свободном пространстве и течение в пористой среде.

Величина **пористости** ε описывает локальную долю объема, доступную для жидкости.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\rho}{\varepsilon} \mathbf{u} \otimes \mathbf{u} \right) \right) = -\nabla p - \frac{\mu}{k} \mathbf{u} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \cdot (2\mu \mathbf{S}) + (\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + \mathbf{f}_c$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \alpha) + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha) + \nabla \cdot (\alpha (1 - \alpha) \mathbf{u}_r) = 0$$

проницаемость

$$\mu/k = (M_1 + M_2)^{-1} = k_0^{-1} \left(\frac{k_1}{\mu_1} + \frac{k_2}{\mu_2} \right)^{-1}$$

фазовый дрейф $\mathbf{u}_r = f(\nabla p, \alpha)$

капиллярная сила $\mathbf{f}_c = f(p_c, \alpha)$

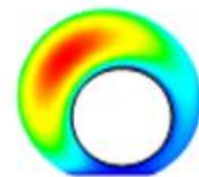
Модель замыкается подмоделями относительной фазовой проницаемости и капиллярного давления

$$k_i = k_i(\alpha_1) \quad i = 1, 2$$

$$p_c = p_c(\alpha_1)$$



Двухфазное течение в модели керна

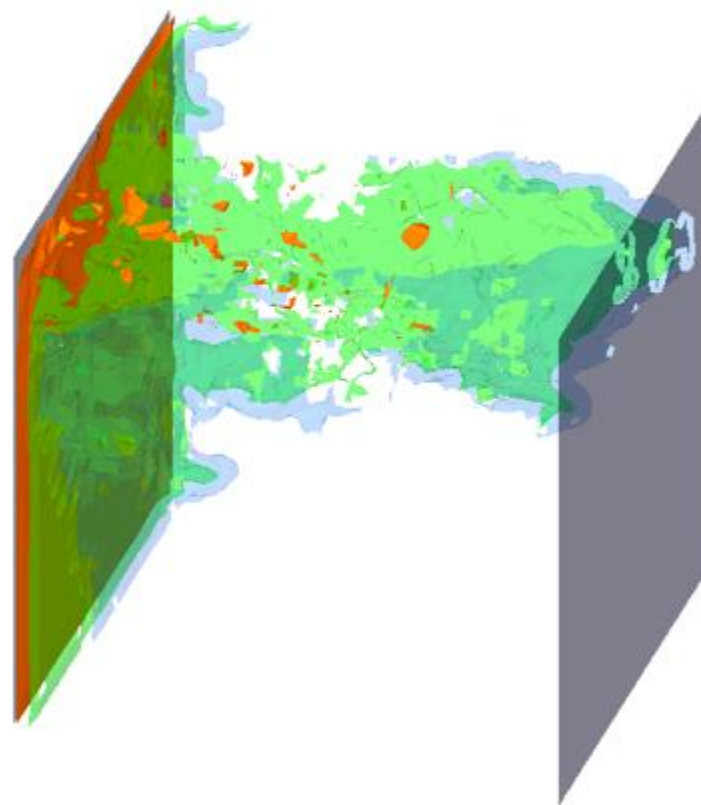


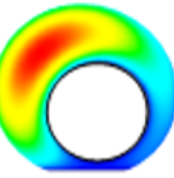
Динамика вытеснения жидкости из 3D воксельной модели

Воксельная модель 250^3 . Модель VOF



Воксельная модель 50^3 . Течение в пористой среде



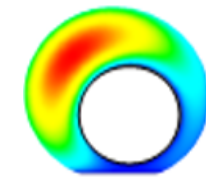


SigmaFlow – 2021

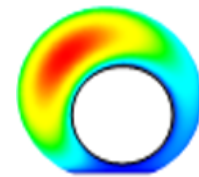
- Развитие моделей течения **неньютоновских упруго-вязкопластических сред**,
моделирование турбулентных течений неньютоновских сред
- Специализированная версия для моделирования **течений в моделях керна**,
моделирование двухфазных течений в пористых средах
- Развитие программы для моделирования **аэродинамики городской застройки** и распространения экологически вредных выбросов
- Решение задачи защиты дорог от занесения снегом



Специализированная версия для моделирования распространения экологически вредных выбросов

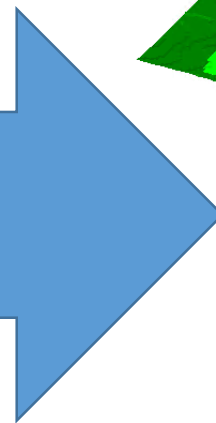
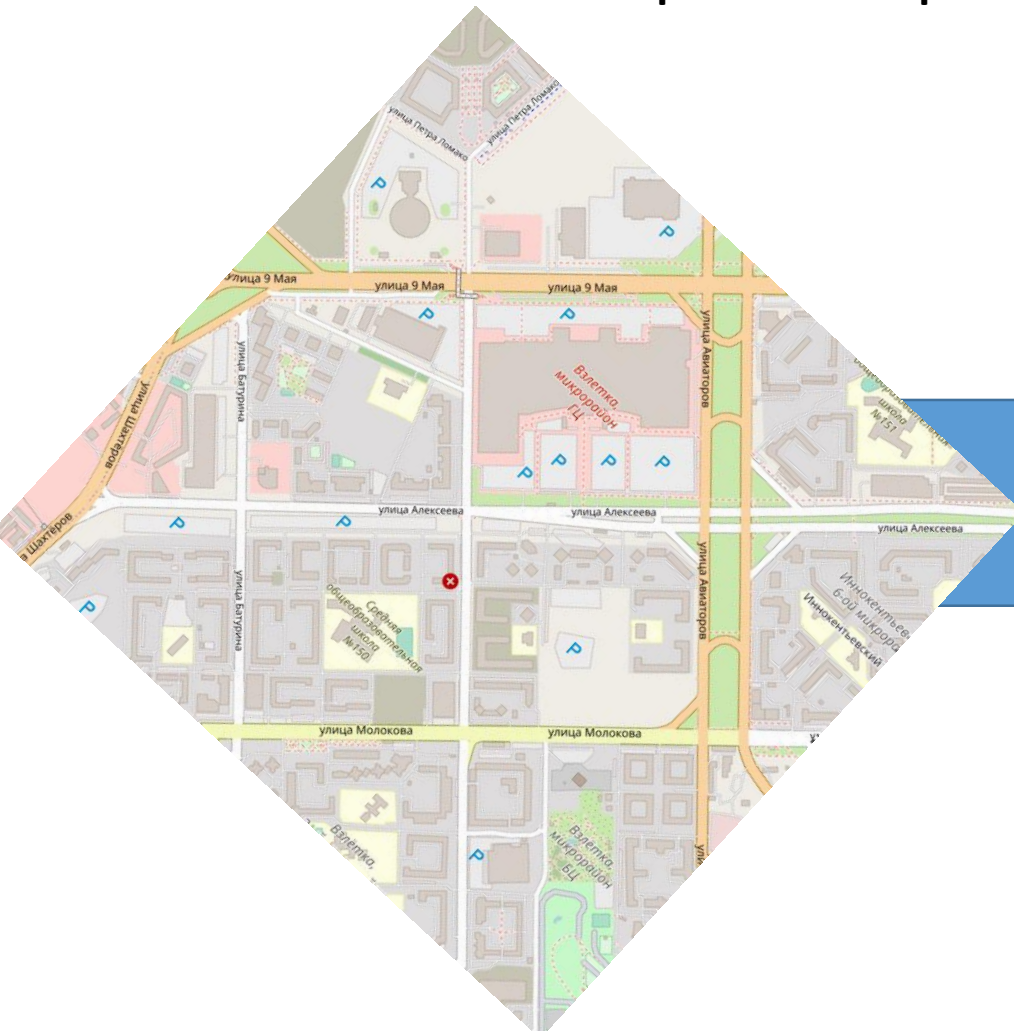


- Микромасштабная математическая модель описывающая динамику атмосферы и режимы переноса загрязняющих газовых и дисперсных примесей в атмосфере города Красноярск, с учетом реального рельефа, влияния реки Енисей, особенностей метеорологических режимов, воздействия солнечного и теплового излучения, сопряженного теплообмена с элементами городского (здания) и природного (почва) ландшафта.
- Уравнение сохранения энергии записывается через потенциальную температуру. Для переноса частиц используется диффузионно-инерционная модель движения малоинерционных частиц. Для расчета переноса излучения метод конечных объемов с независимым расчетом длинноволнового и коротковолнового полей излучения. Для определения температуры на поверхности используется модель сопряженного теплообмена.
- В математической модели для задания граничных и начальных условий и описания объемных источников загрязнений используется данные, разработанной системы сбора информации о состоянии окружающей среды и метеоусловий г. Красноярск.
- Для построения расчетной области используются GIS данные цифровой модели рельефа высокого разрешения (15м) и проекта OpenStreetMap для учета городских построек.

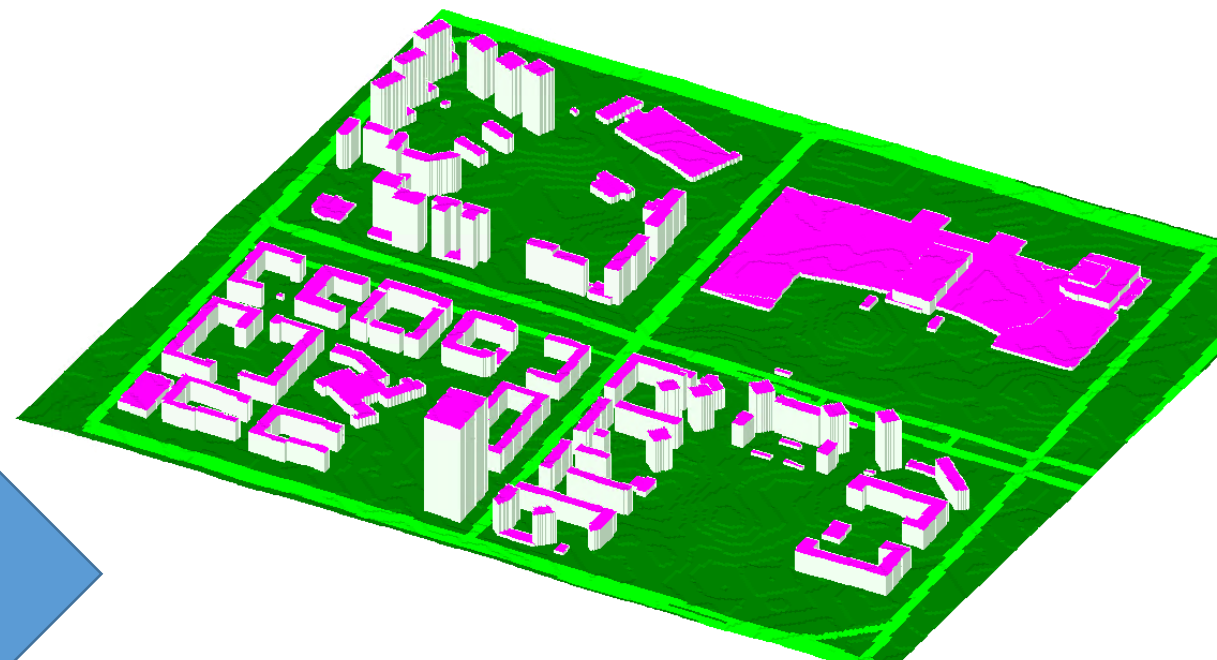


Построение геометрии и расчетной сетки

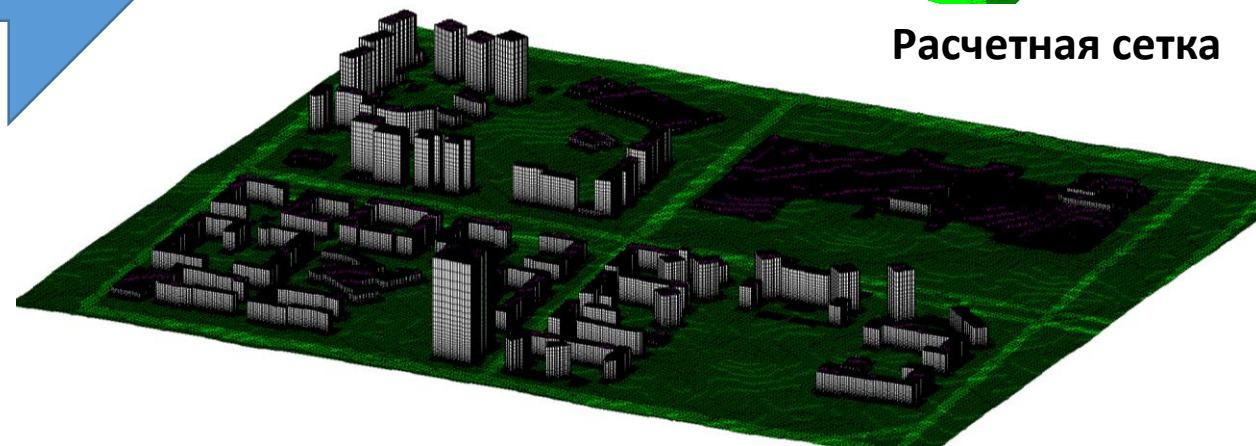
OpenStreetMap



Расчетная область



Расчетная сетка





Эксперимент

Тандемное расположение зданий

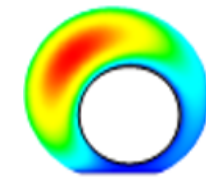
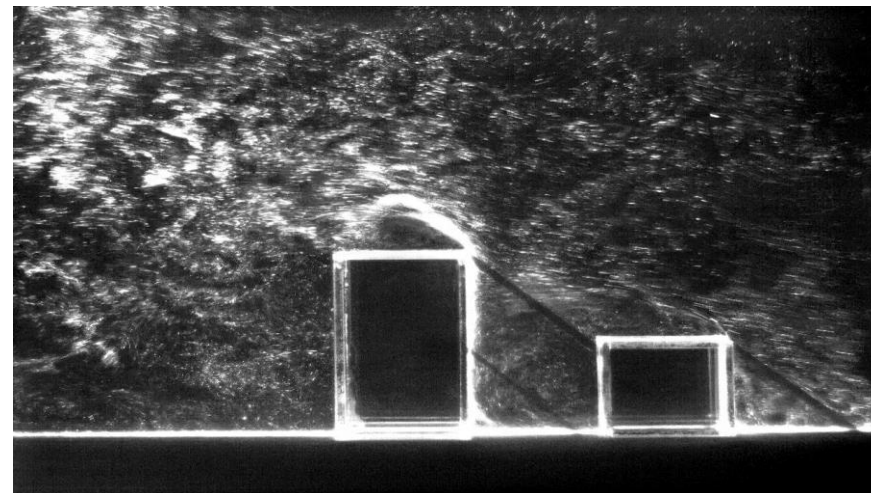


Схема с исследуемым микрорайоном

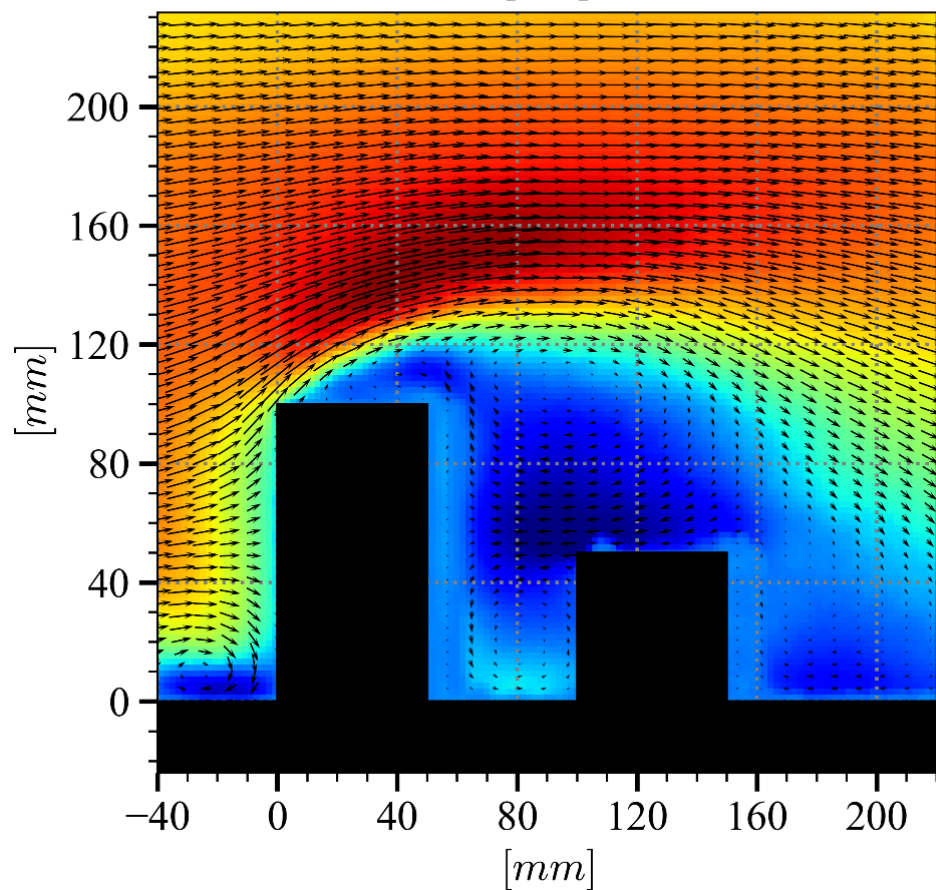
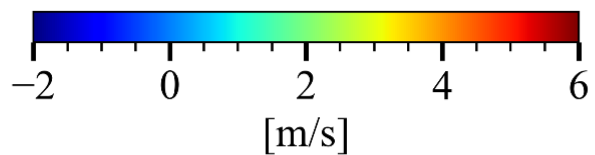


Модель района в аэродинамическом участке

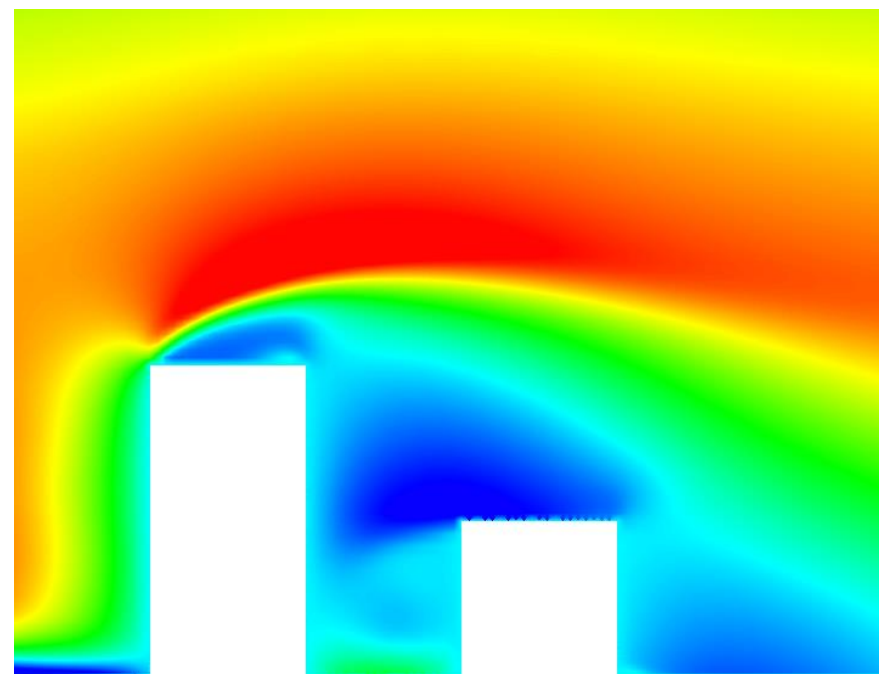
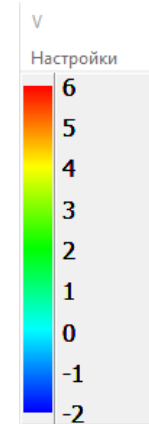
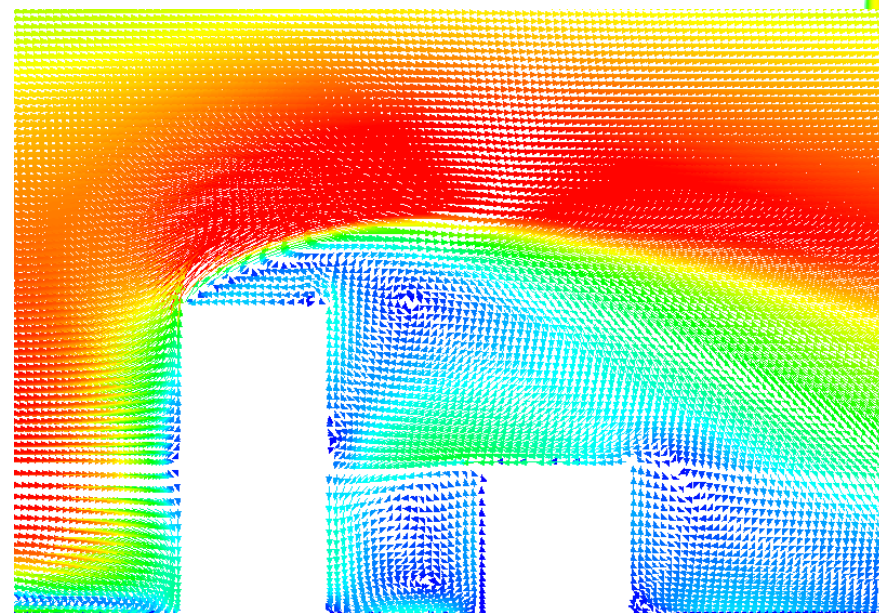
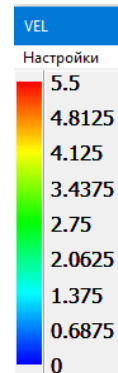
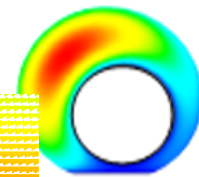


Тандемное расположение зданий
Переднее: ШхДхВ = 50x100x100
Заднее : ШхДхВ = 50x100x50

PIV эксперимент

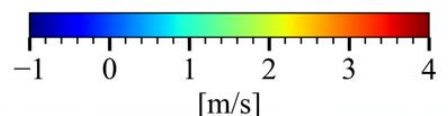


Расчет



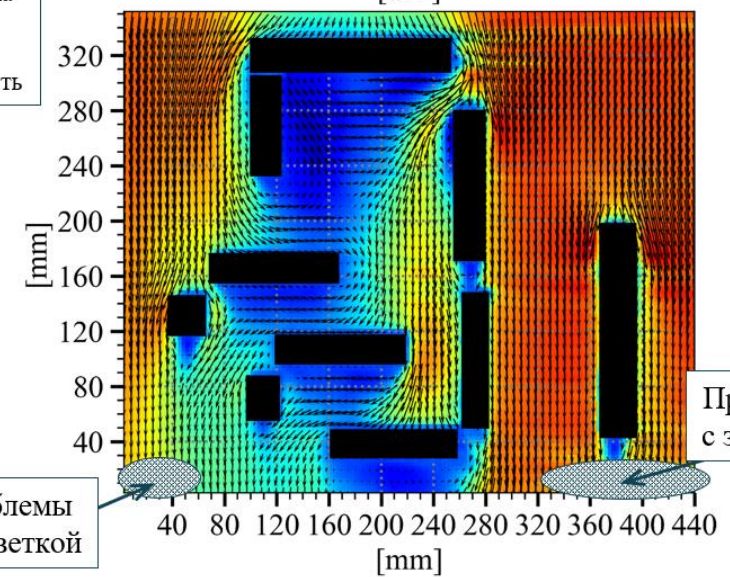


Направление
потока



Векторы показывают
направление потока

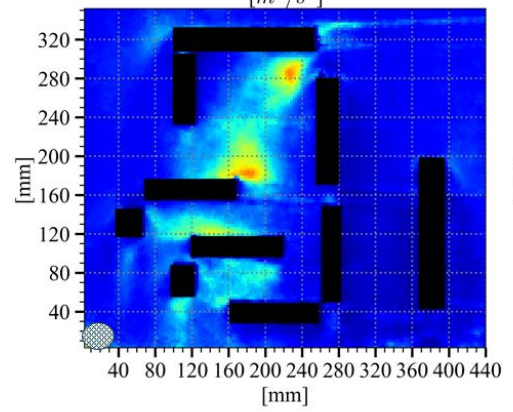
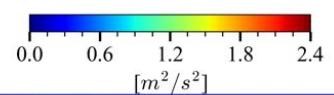
Цвет показывает
продольную скорость



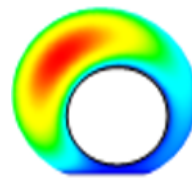
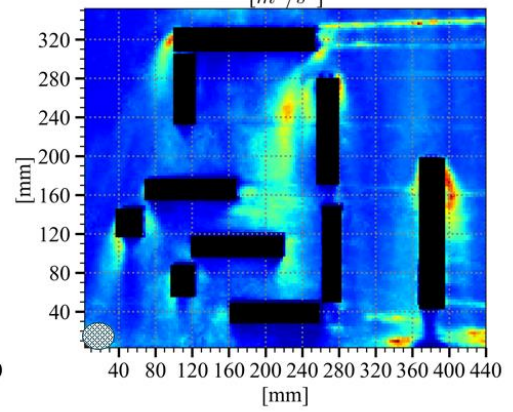
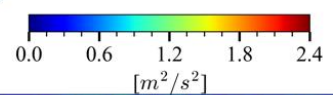
Проблемы
с засветкой

Проблемы
с засветкой

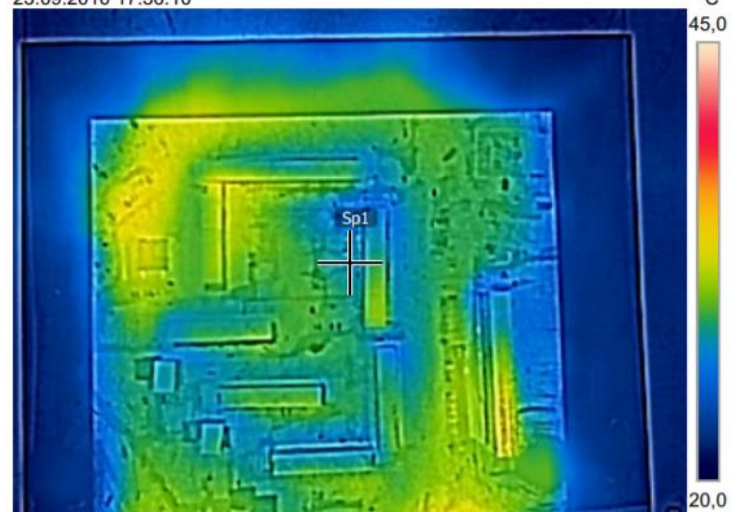
Поперечная компонента



Продольная компонента



23.09.2010 17:36:10



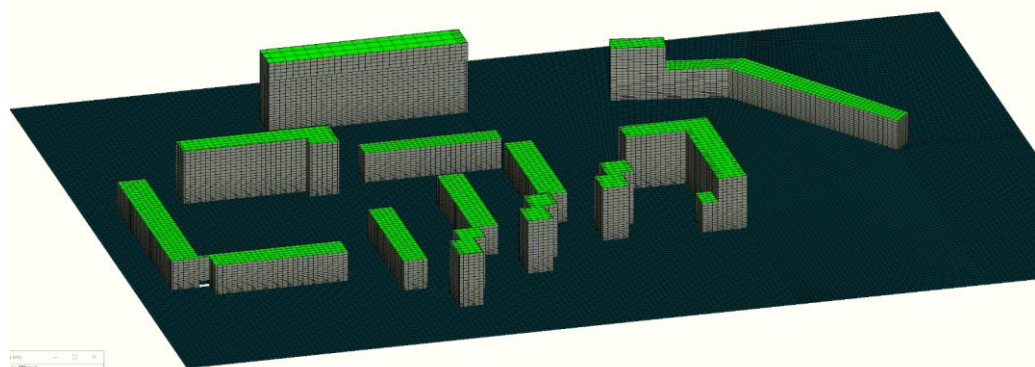
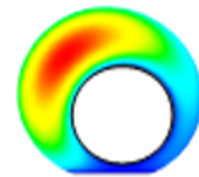
FLIR1163.jpg

FLIR C2

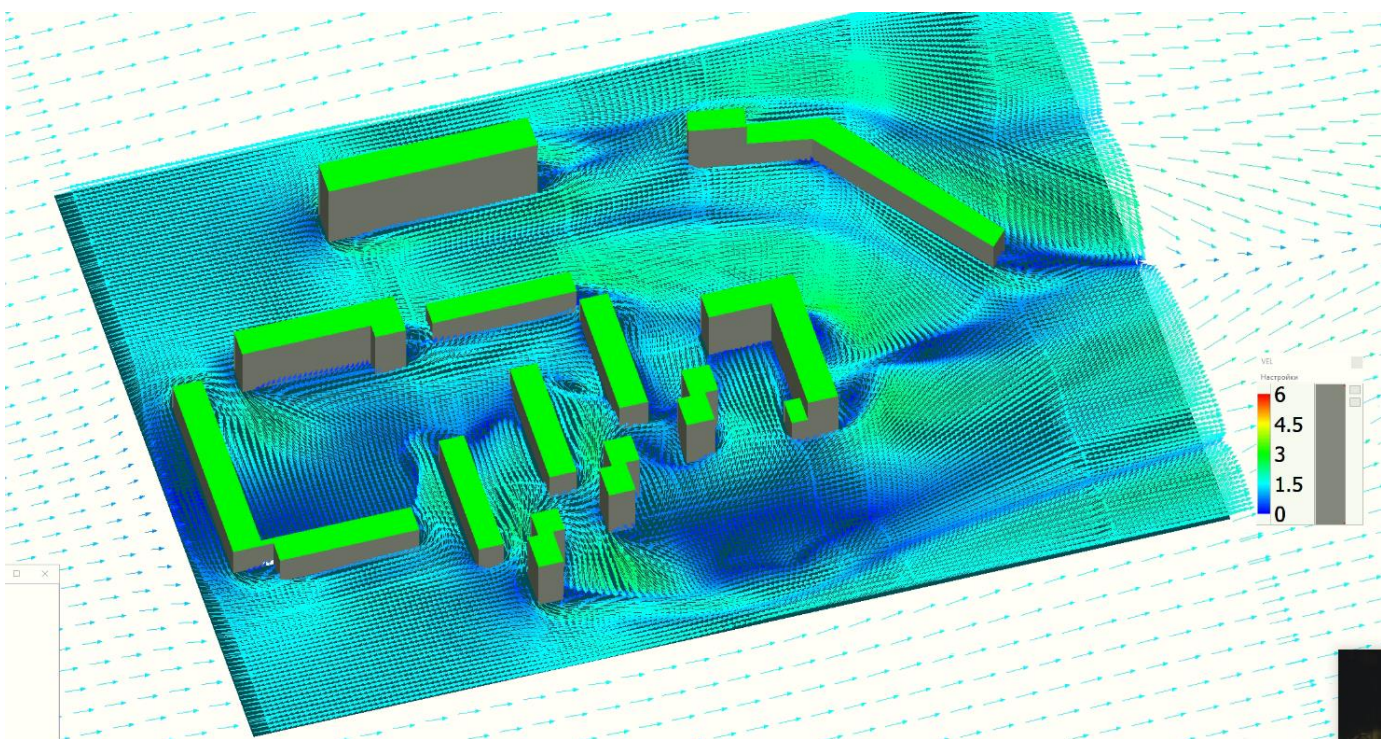
720007586



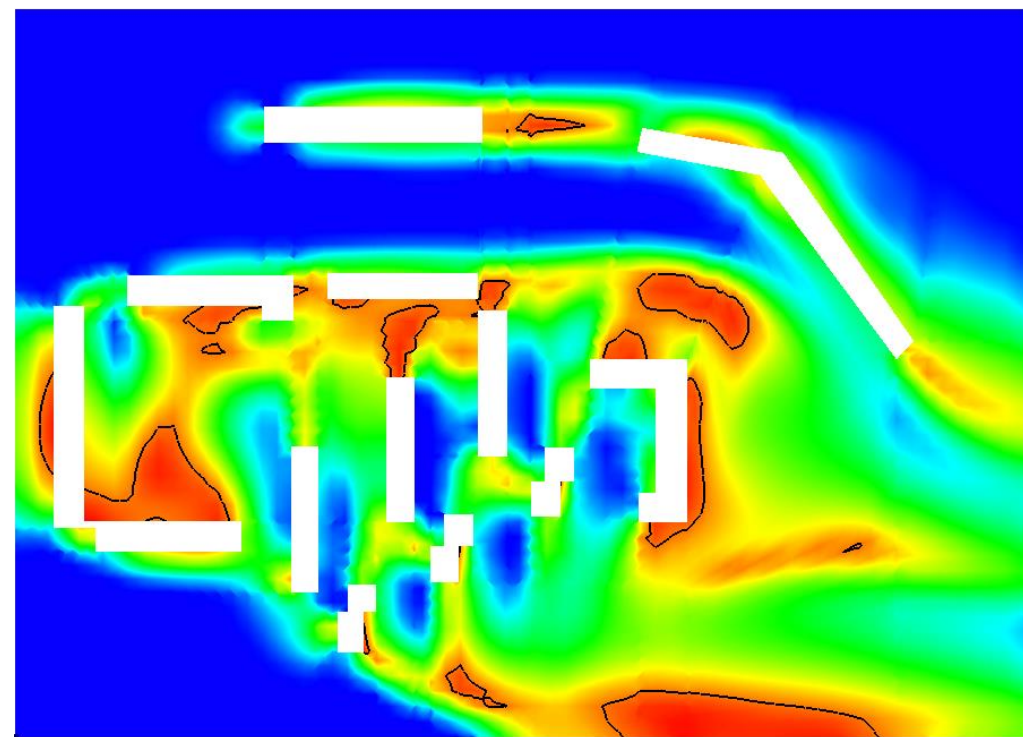
Результаты моделирования



Геометрия и расчетная сетка



Поле скорости в горизонтальном сечении на высоте 2 м, м/с

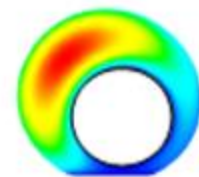


Зоны отложений

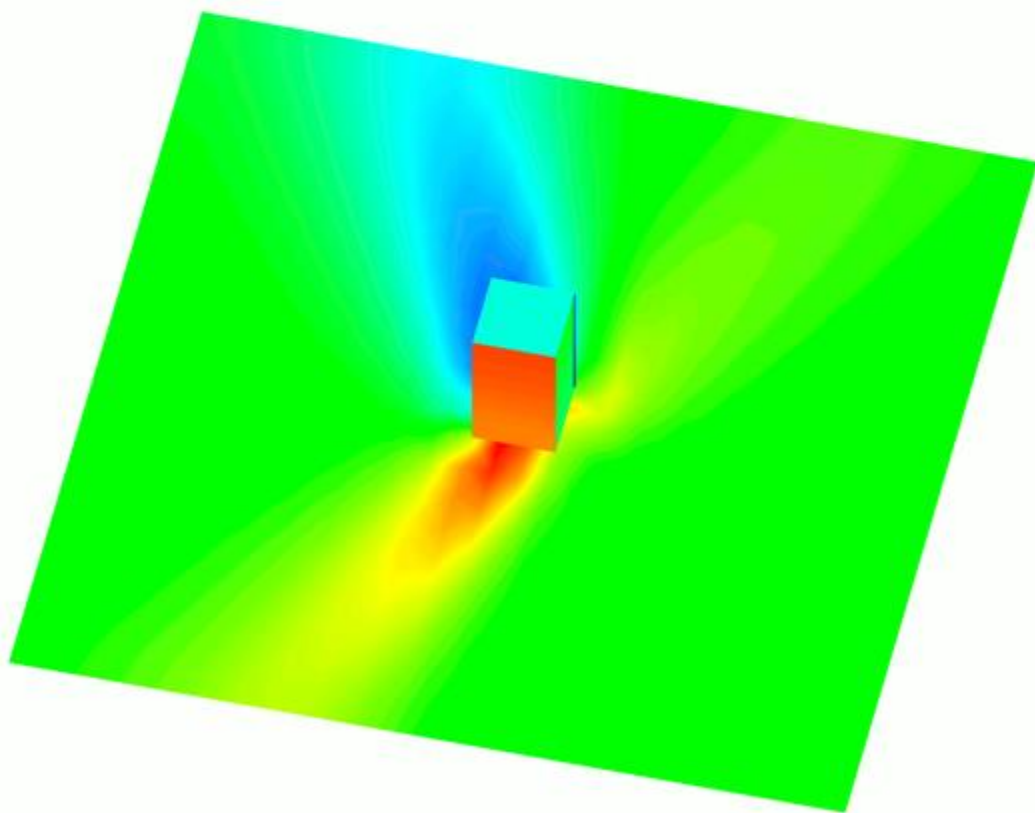


Расчет излучения на основе МКО.

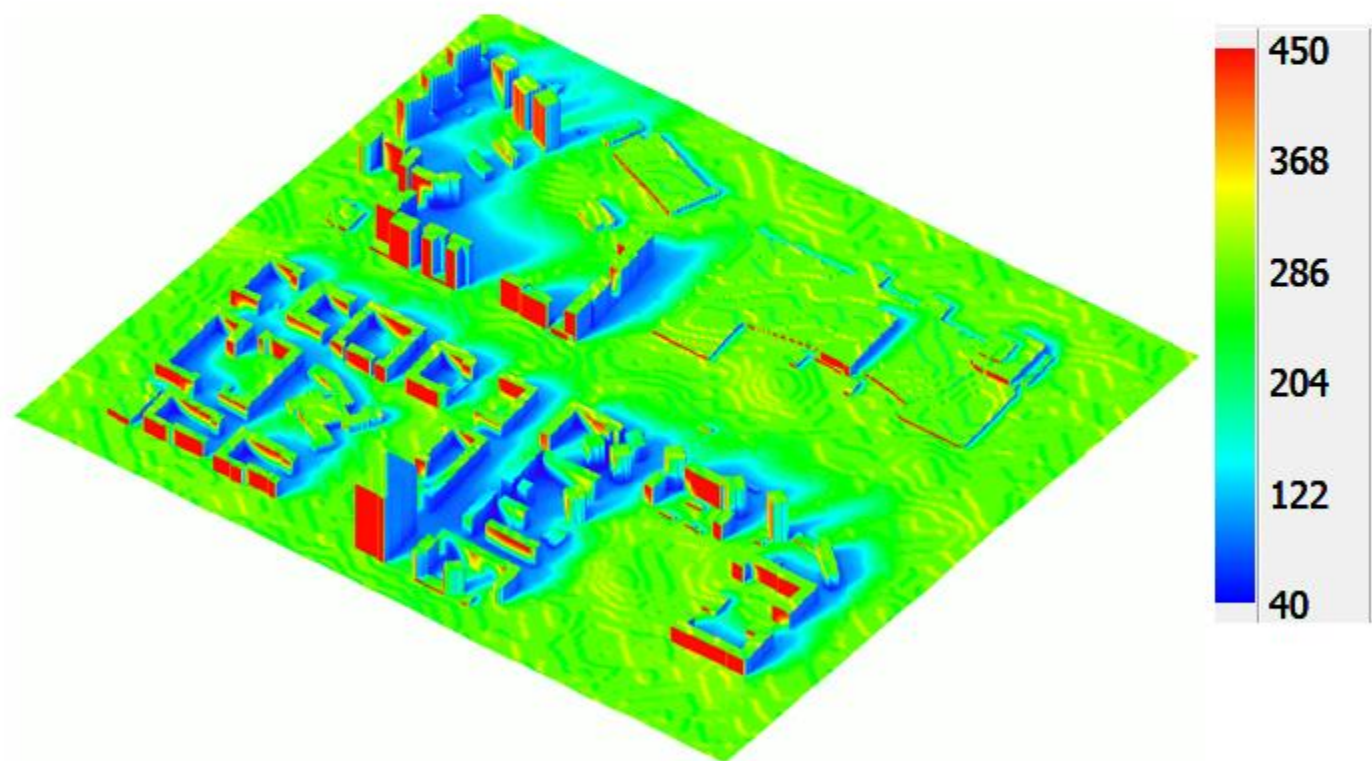
Для солнечного излучения рассчитывается дополнительный контрольный угол.



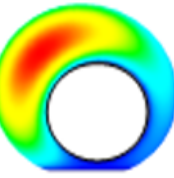
Отражение потока солнечного излучения



Суточная динамика

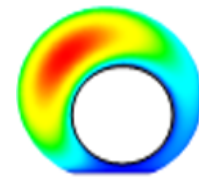


Поток падающего солнечного излучения, Вт/м²



SigmaFlow – 2021

- Развитие моделей течения **неньютоновских упруго-вязкопластических сред**,
моделирование турбулентных течений неньютоновских сред
- Специализированная версия для моделирования **течений в моделях керна**,
моделирование двухфазных течений в пористых средах
- Развитие программы для моделирования **аэродинамики городской застройки** и распространения экологически вредных выбросов
- **Решение задачи защиты дорог от занесения снегом**



Для описания движения снега используется инерционно-диффузионная модель переноса.

Уравнение переноса объёмной концентрации частиц:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi (\mathbf{U} + \mathbf{U}_r)] - \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\phi} \nabla \phi \right) = S_\phi$$

где ν_t – коэффициент турбулентной вязкости течения несущей среды, σ_ϕ – турбулентное число Шмидта, S_ϕ – объёмный источник частиц, \mathbf{U} – средняя скорость несущей фазы, \mathbf{U}_r – скорость межфазного скольжения.

Граничное условие на поверхности земли на ϕ_0 задается через расчет концентрации снега в слое сальтации.

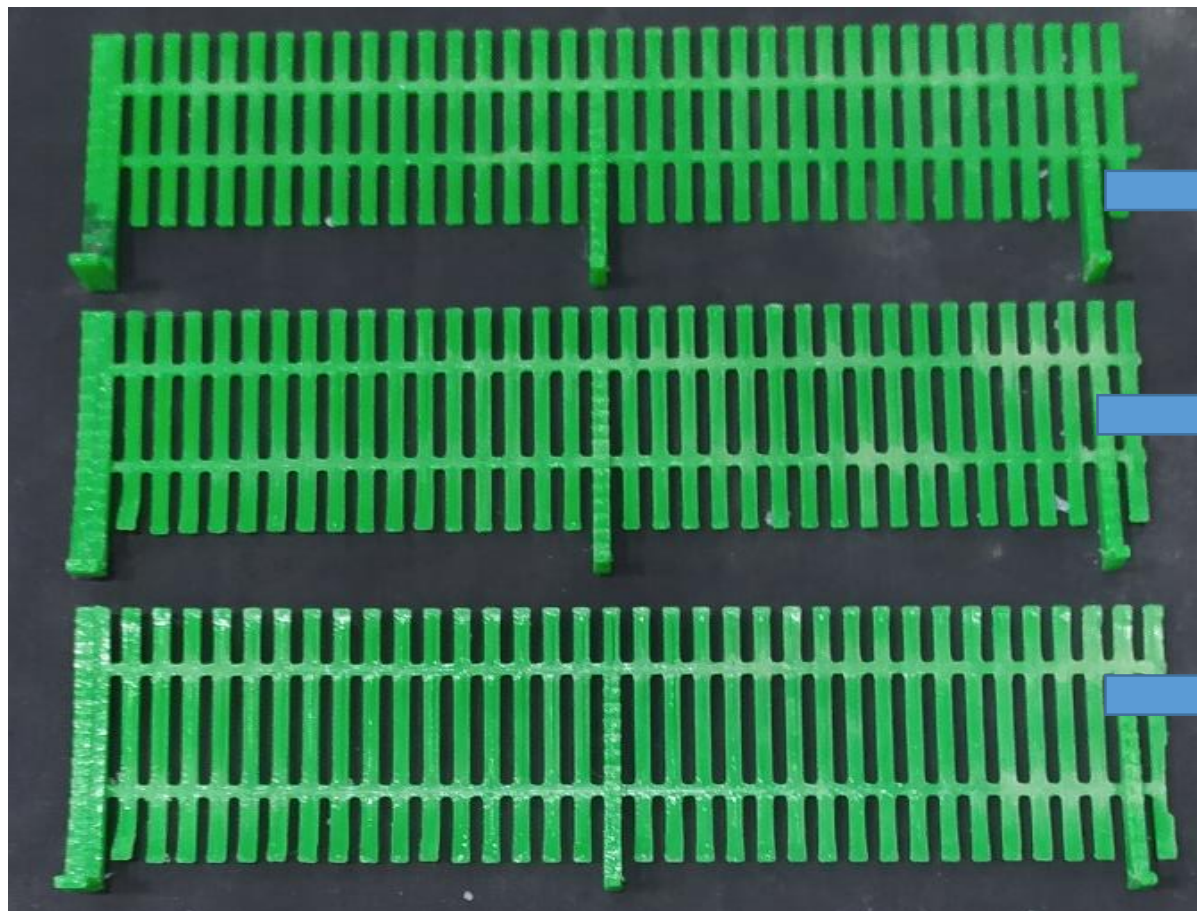
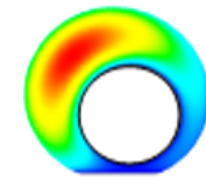
$$\phi_0 = \phi_{salt} = \frac{\rho_{air}}{3.29u^*} \max \left(0, 1 - \frac{u_t^2}{u^{*2}} \right)$$
$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_{\parallel}}{\rho_{air}}}$$

где τ_{\parallel} - напряжение на поверхности, u^* сдвиговая скорость, u_t – ее пороговое значение

$$u_t \left[\frac{m}{s} \right] = 0.35 + \frac{T[^\circ C]}{150} + \frac{T[^\circ C]^2}{8200}$$



Исследование влияния нижнего зазора



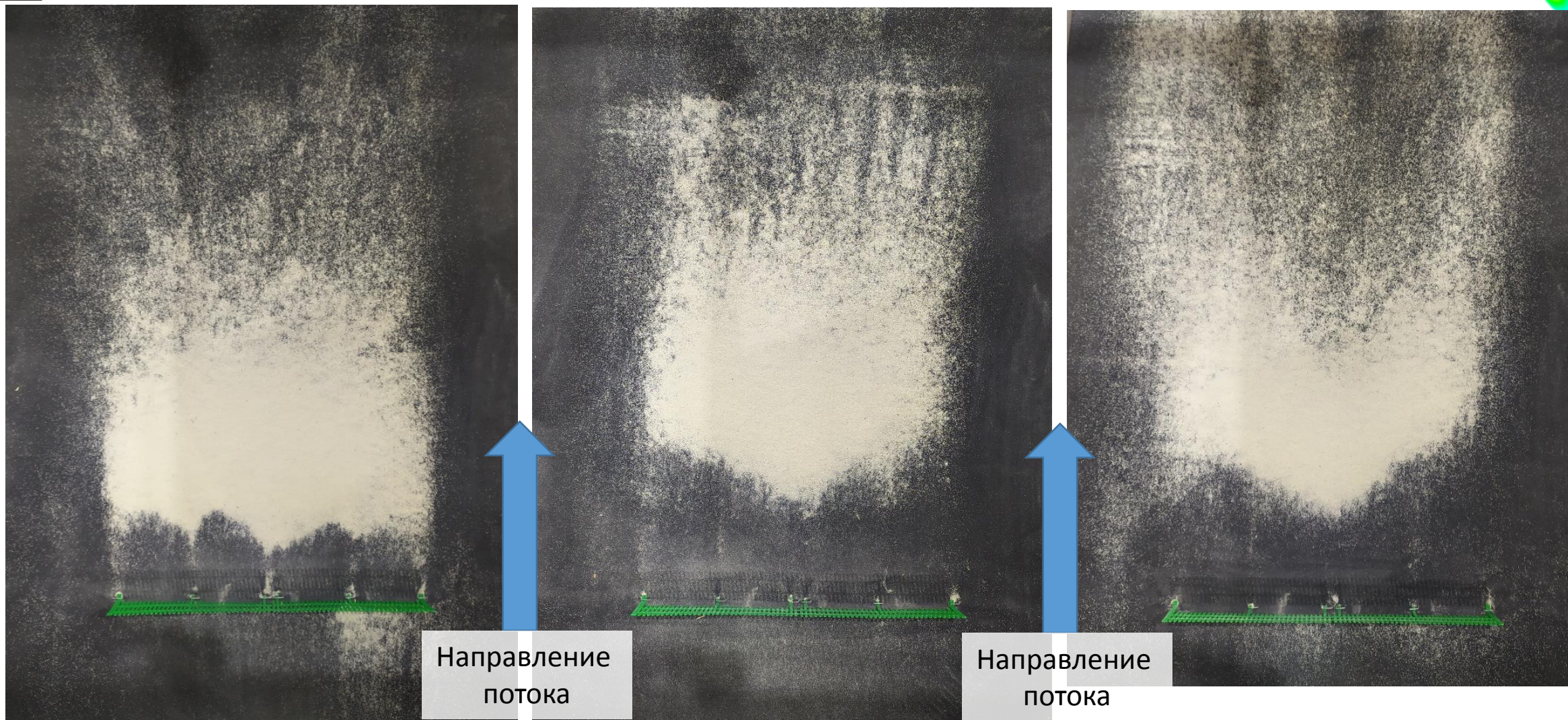
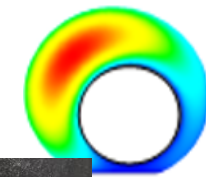
Увеличенный зазор. Просветность 50 %, зазор 15 мм, расположение "досок" вертикальное

Базовый вариант. Просветность 50 %, зазор 10 мм, расположение "досок" вертикальное

Уменьшенная зазор. Просветность 50 %, зазор 6 мм, расположение "досок" вертикальное



Просветность 50 %, зазор 6, 10, 15 мм



Зазор 6 мм

Зазор 10 мм

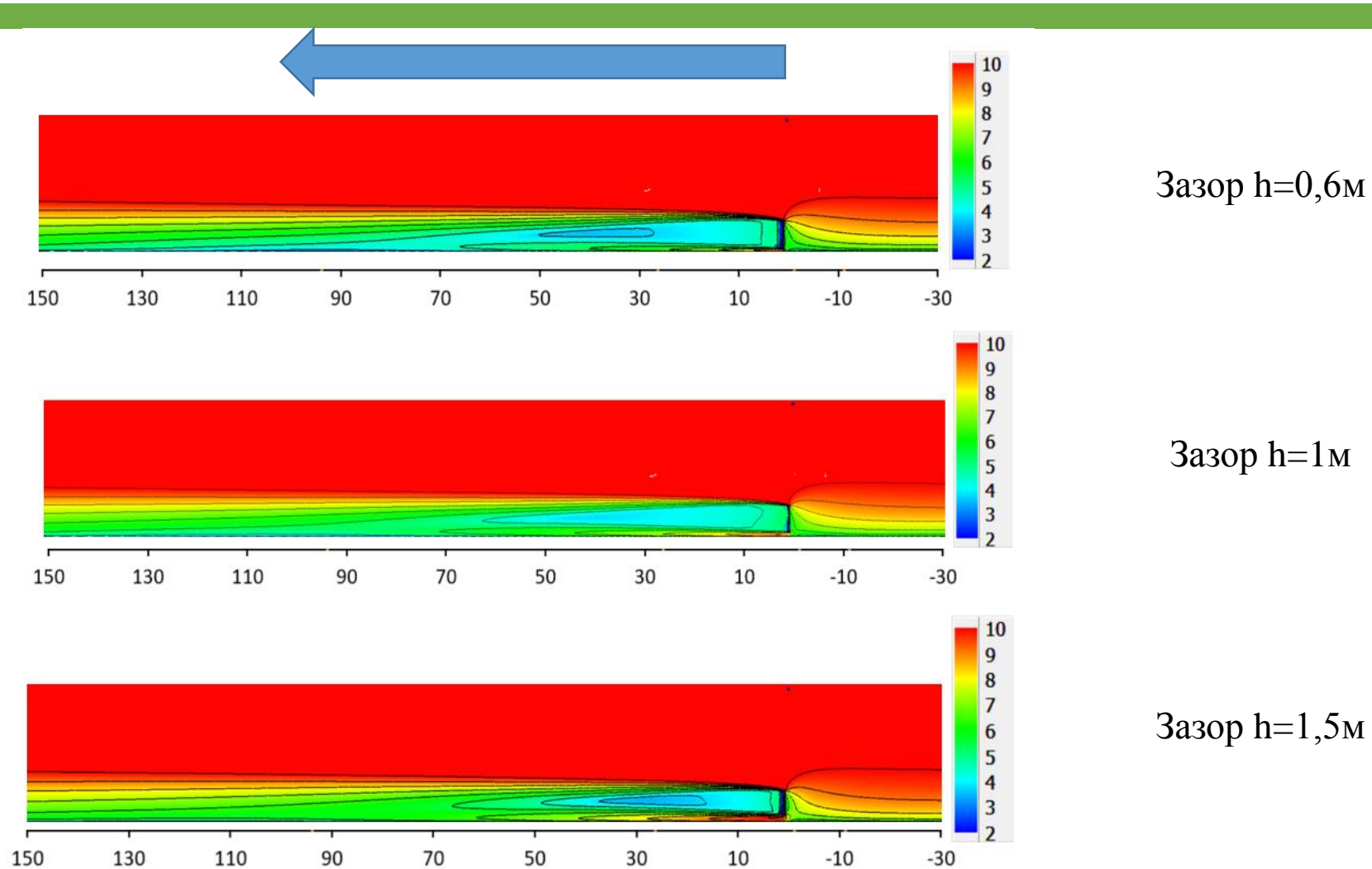
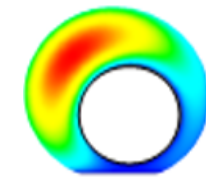
Зазор 15 мм

Направление
потока

Направление
потока



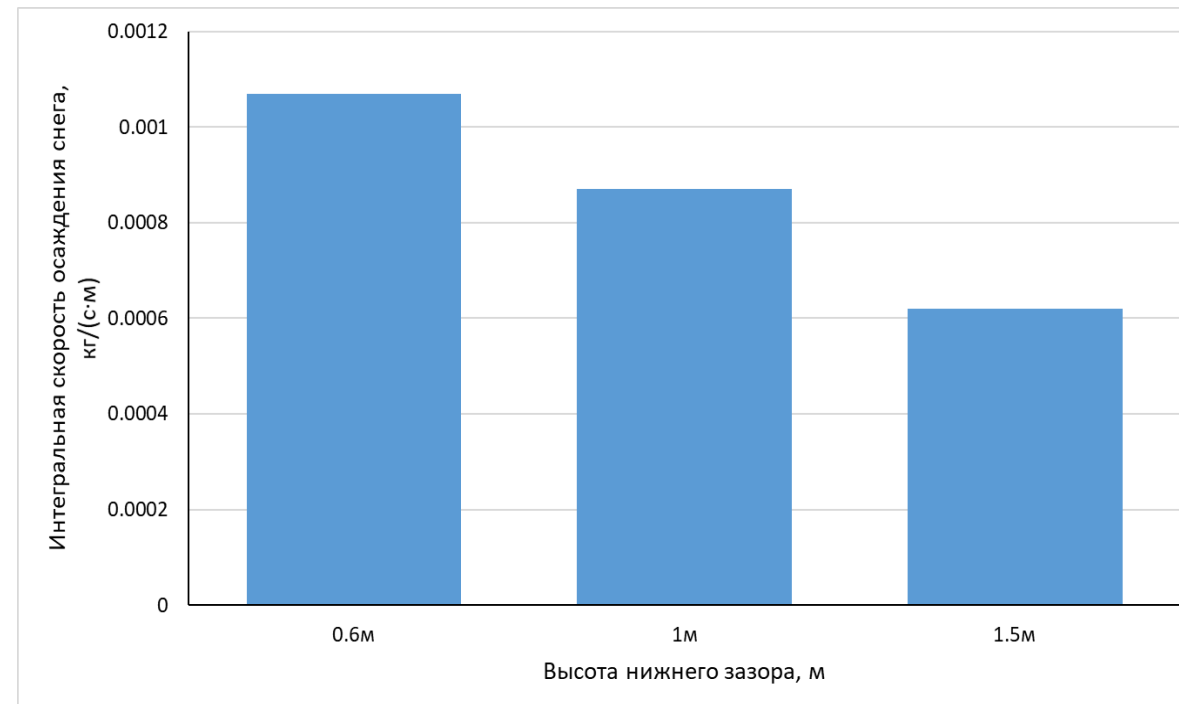
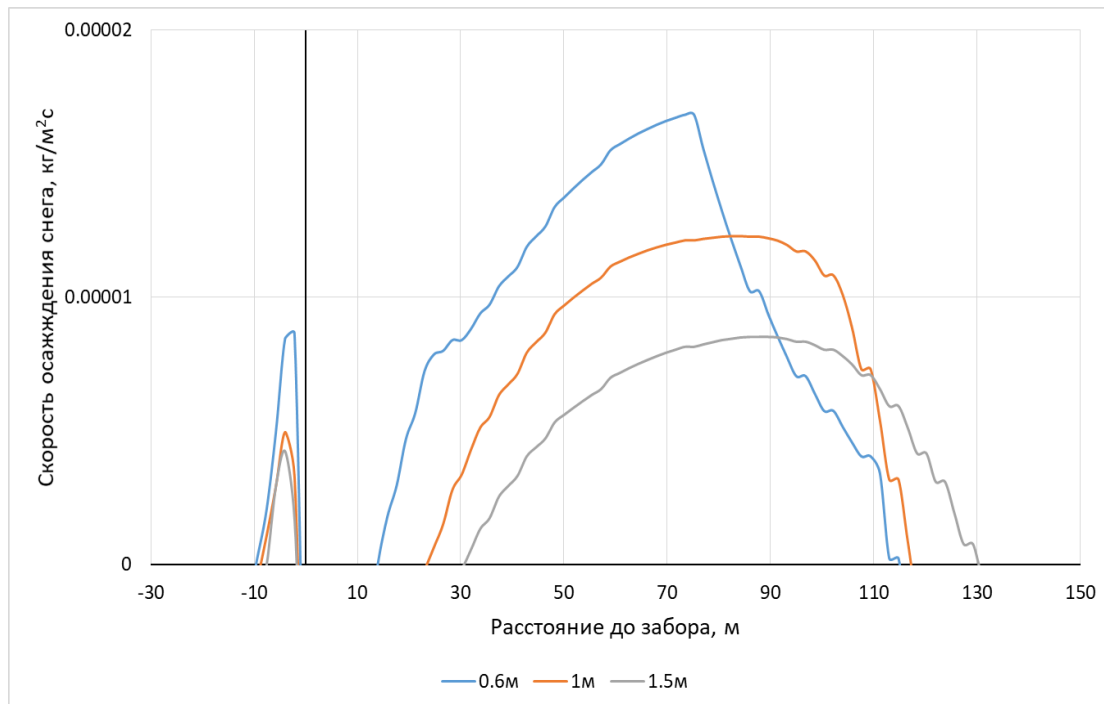
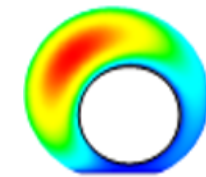
Исследование влияния нижнего зазора



Поле скорости в центральном продольном сечении, для разной величины зазора



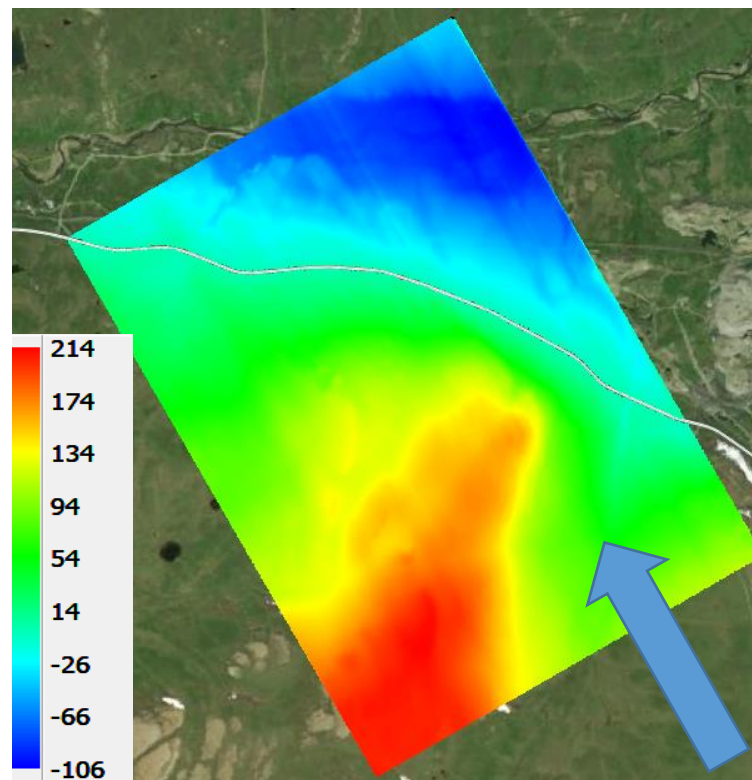
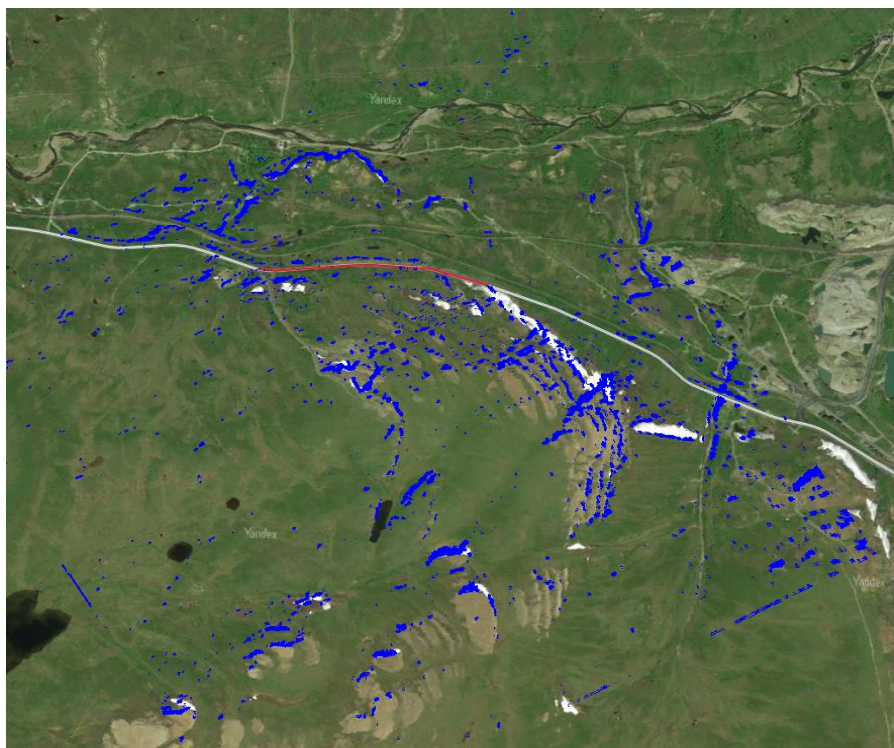
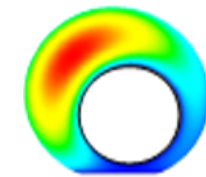
Анализ влияния высоты нижнего зазора на осаждение снега



Распределение скорости осаждения снега для заборов с разной величиной нижнего зазора

Значение суммарного осаждения на заборах с разной величиной нижнего зазора

С уменьшением высоты зазора интегральная эффективность снегозадержания увеличивается. Интегральные значения скорости осаждения максимальны для высоты нижнего зазора 0,6м, при увеличении высоты до 1м снижаются ~20%, а при высоте 1.5 м уменьшаются еще на ~30%. Однако, при уменьшении высоты зазора резко возрастает вероятность забивания данного зазора снегом в безветренные снегопады, с резкой потерей эффективности работы снегозадерживающего забора.

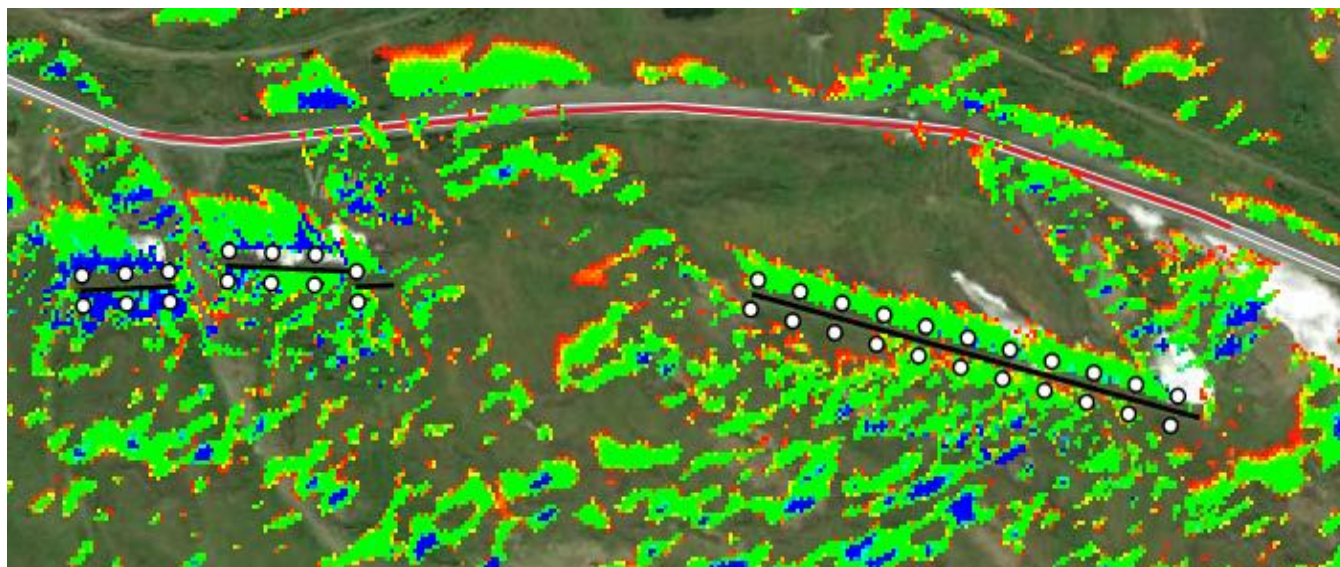
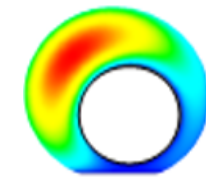


Карта высот:
относительно дороги
(дорога $h = 0.0$ м) вдоль
господствующего
направления
снегопереноса (показано
стрелкой)

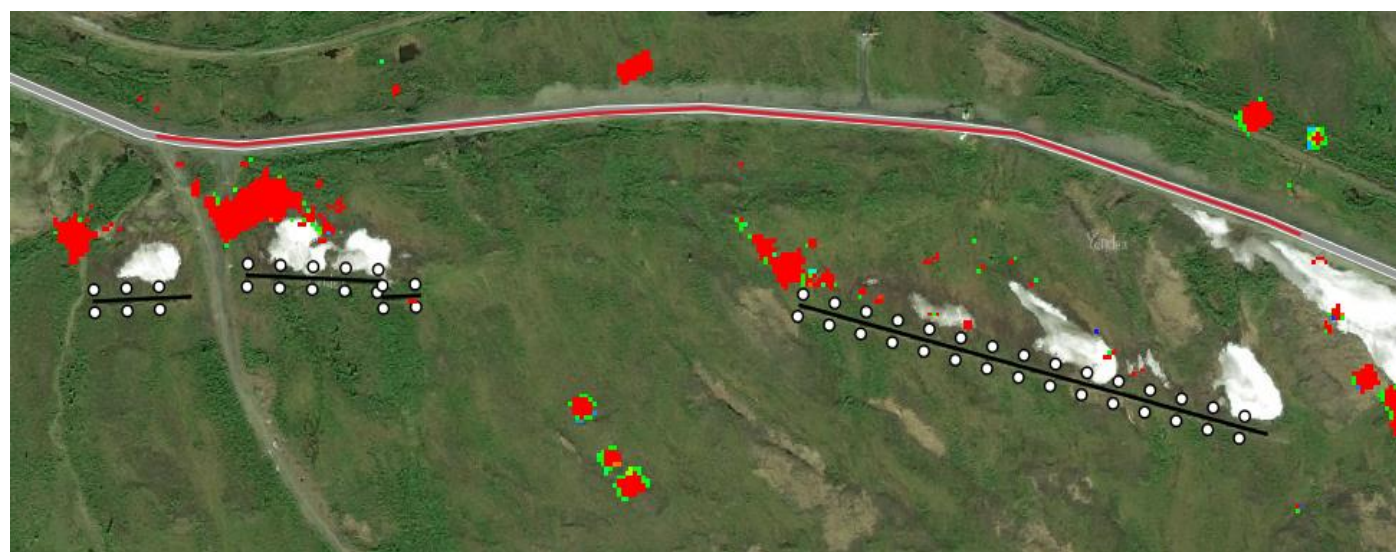
Формирование естественных снежных отложений.



Формирование снеговых отложений вблизи снегозадерживающих устройств. Существующий вариант (5.5).



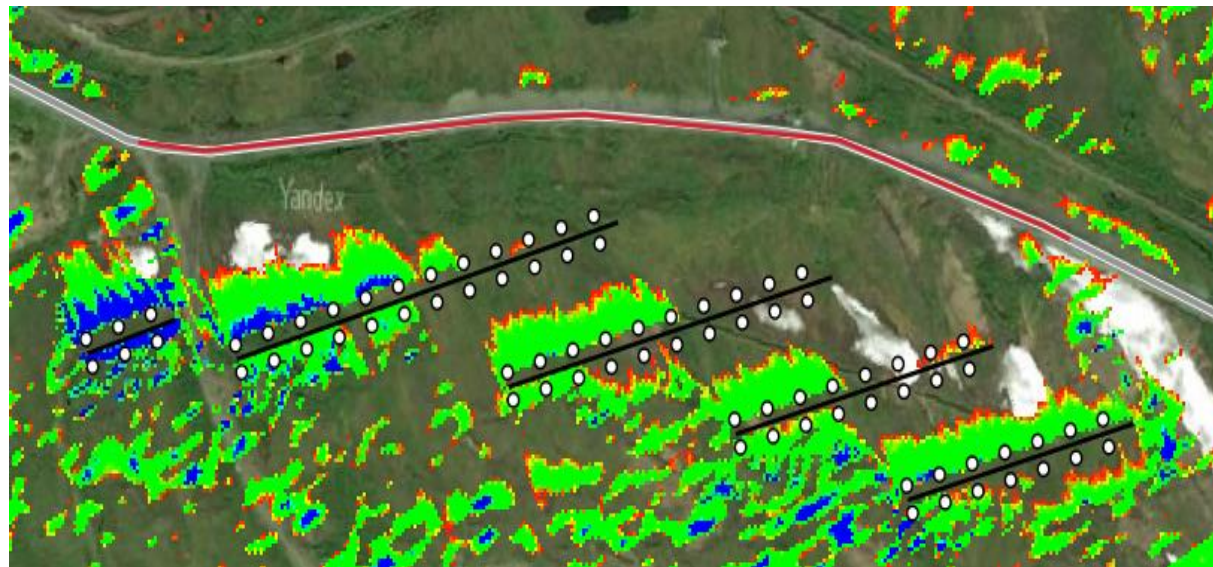
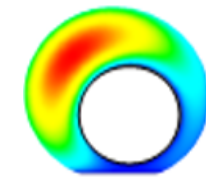
область равновесного
осаждения частиц снега



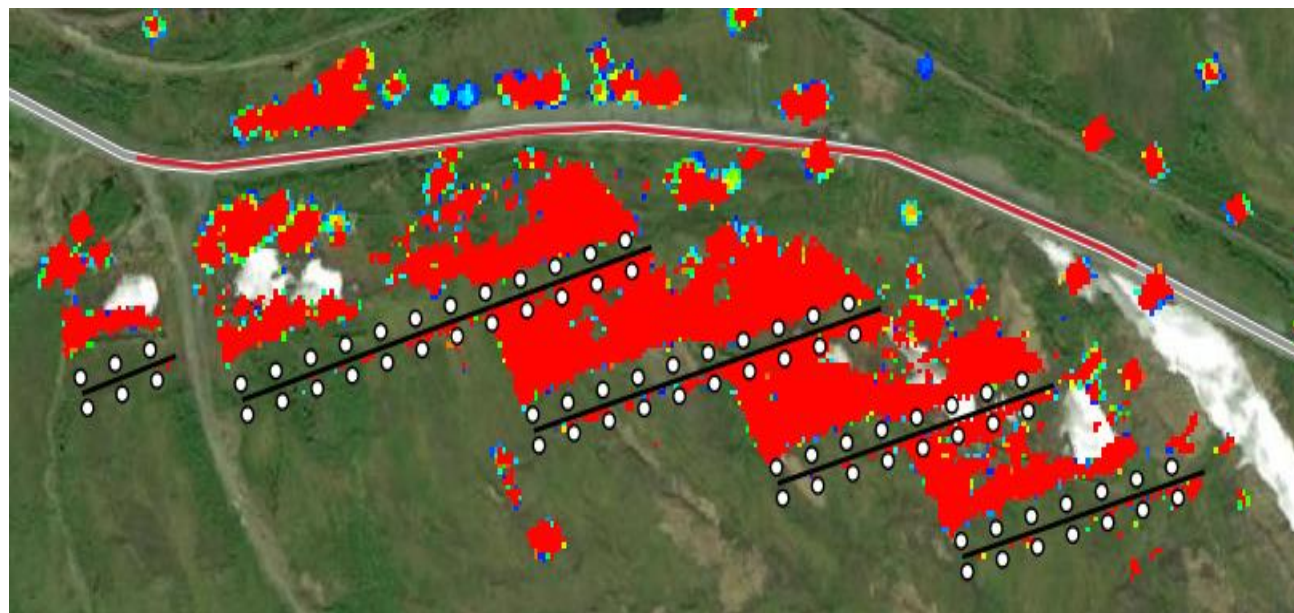
потенциал осаждения
снега



Формирование снеговых отложений вблизи снегозадерживающих устройств. Предложенный вариант (5.7).



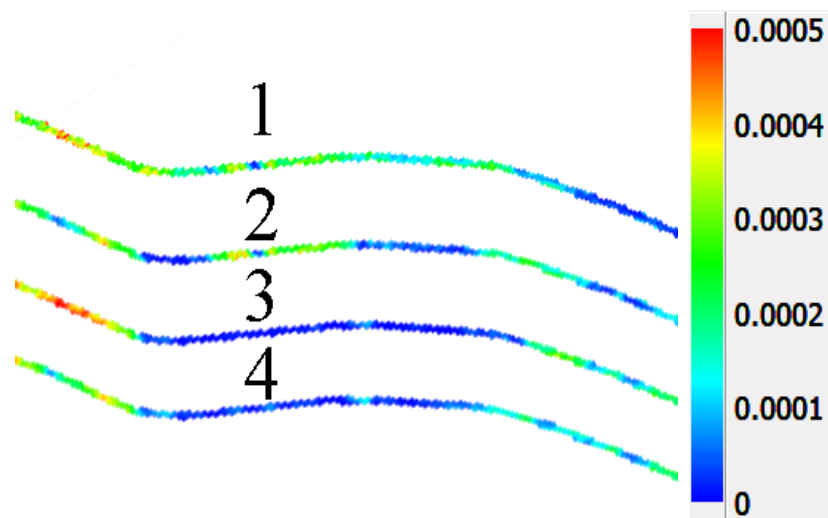
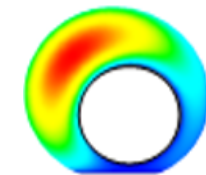
область равновесного
осаждения частиц снега;



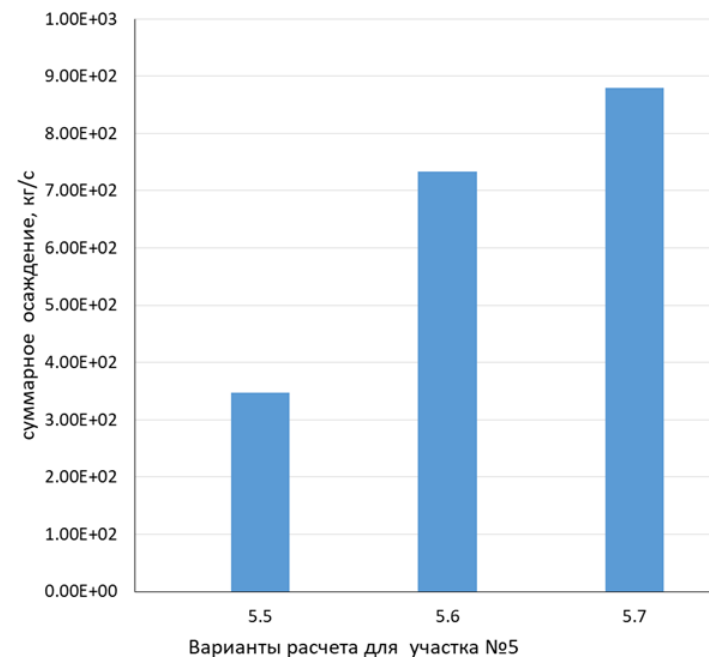
потенциал осаждения
снега



Сравнение вариантов



Концентрация метелевого снега в приповерхностной области дороги для вариантов 1 (5.1), 2 (5.5), 3 (5.6), 4 (5.7).

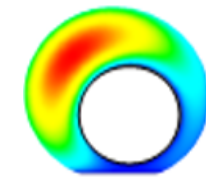


Сравнение интегральной скорости осадения снега вблизи СУ для различных вариантов.

При установке СУ согласно предложенному варианту (5.7) суммарное снегозадержание увеличивается более чем в 2,5 раза по сравнению с существующим вариантом.



CFD-weekend 2021



**Комплекс программ SigmaFlow:
современное состояние, новые задачи**

Гаврилов А.А., Дектерёв А.А

Институт Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе
Красноярский филиал

Спасибо за внимание!