

# Методы проектирования и выполнения работ по подъему фундаментов зданий, уплотнения грунтов основания нагнетанием саморасширяющихся геополимерных смол

Докладчик:

1. Попсуенко Иван Константинович, Заведующий  
лабораторией №1 НИИОСП им. Н.М. Герсеванова;



# 1. Цель исследования:

- Разработка Стандарта организации (СТО), посвященного методам проектирования и выполнения работ по подъему фундаментов зданий, уплотнения грунтов основания нагнетанием саморасширяющихся геополимерных смол с целью дальнейшего включения результатов исследования в нормативные документы

# 2. Задачи исследования:

- Поднятие опытного фундамента в полунатурных условиях путем инъецирования геополимерных смол;
- Анализ полученных результатов с целью поиска зависимости между требуемым поднятием фундамента, необходимого количества геополимерных смол, а также плотностью грунта в основании поднимаемого фундамента;
- Расчетное моделирование нагружения штампа и последующего инъецирования геополимерных смол в программном комплексе PLAXIS.

## Описание технологии:

Инъецирование геополимерных смол возможно проводить для подъема фундаментов и уплотнения грунтов, а максимальная глубина закачки по опыту составляет 9 м от уровня фундамента. Работы по инъецированию раствора проводят в три этапа:

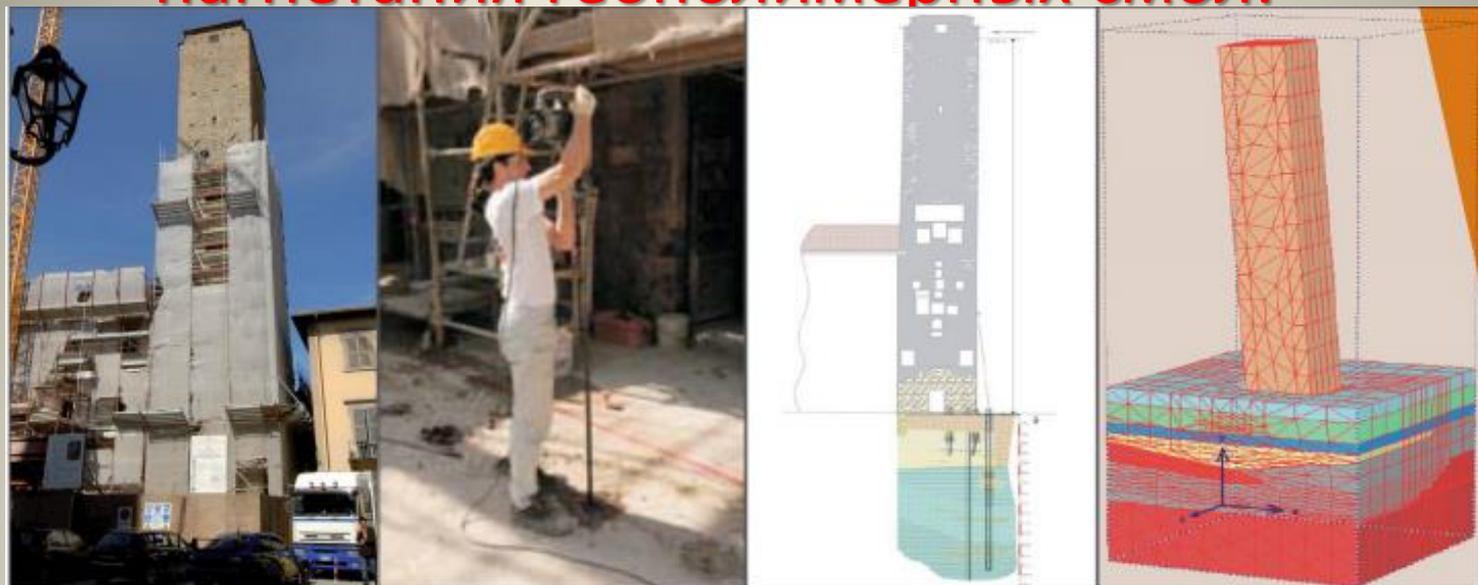
**1 этап:** Бурение отверстий в полу/фундаменте диаметром 12...16 мм, в которые затем вставляют алюминиевые трубки;

**2 этап:** Инъецирование саморасширяющихся геополимерных смол в массив грунта под фундаментом через заготовленные трубки;

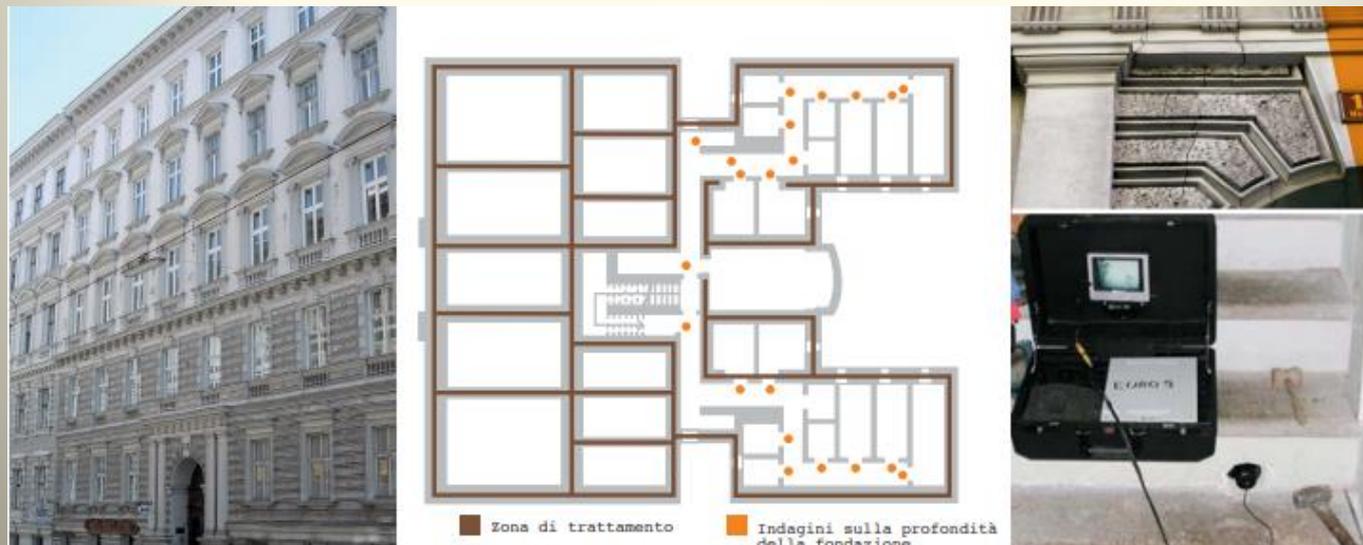
**3 этап:** Быстрое расширение смолы, которая заполняет все пустоты и уплотняет нижний слой грунта, и выравнивает просевшую поверхность или фундамент.



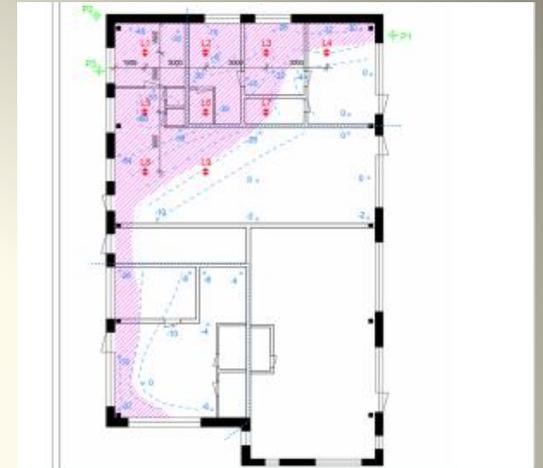
# Примеры использования технологии нагнетания геополлимерных смол:



Предотвращение дальнейшей осадки башни в Перуджи, Италия. Нагнетание на глубину 4,5 м.



Уплотнение грунтов основания исторического здания в Вене, Австрия. 259 п.м. Ленточных фундаментов



Стабилизация просевших полов и фундаментов в коммерческом центре, Восточная Финляндия.



Выравнивание полов в супермаркете, Китай.

# 3. Описание эксперимента:

В лабораторных условиях была искусственно создана просадка фундамента путем его нагружения:

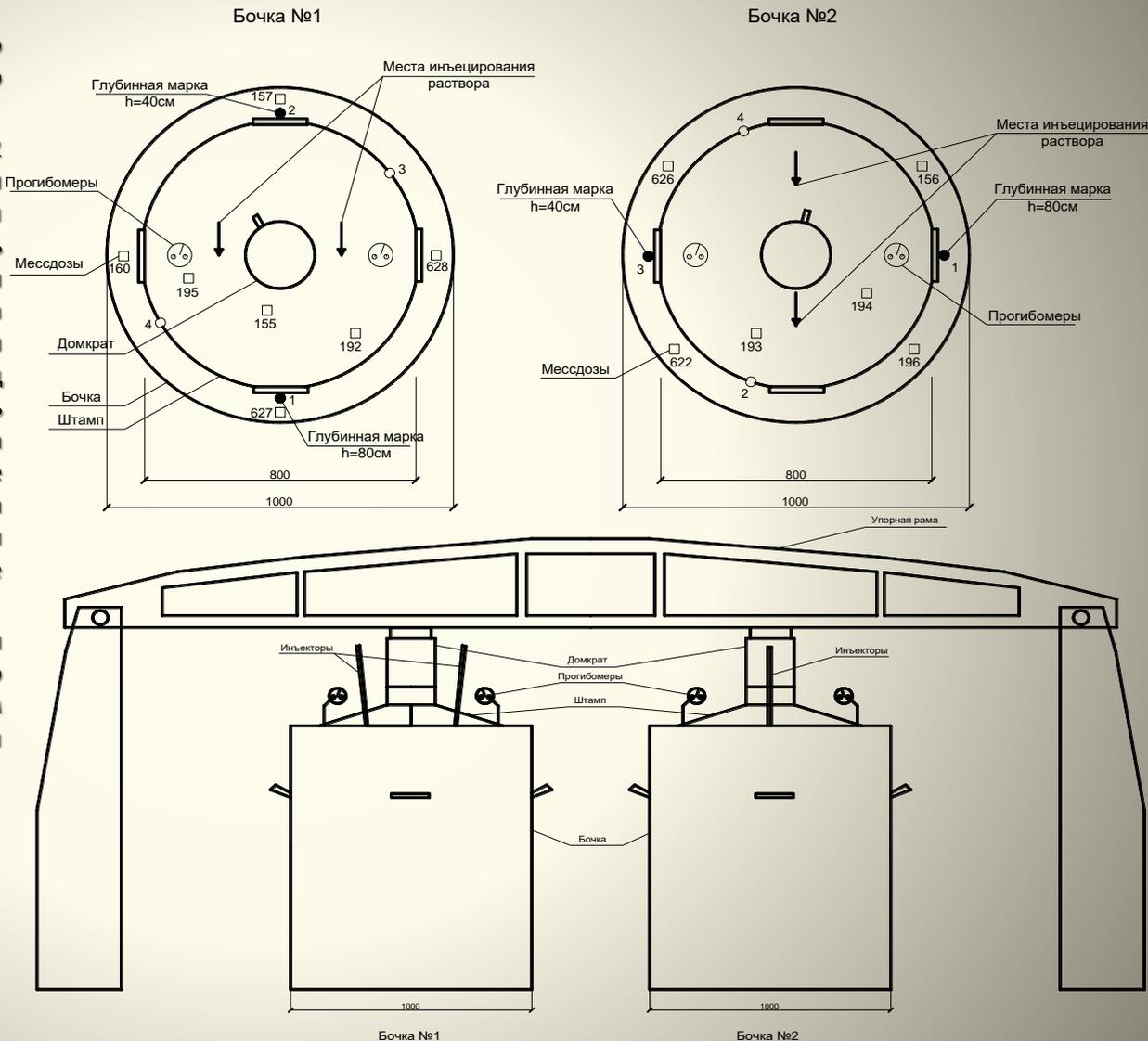
В металлические бочки №1 и №2 Ø 1000 мм и высотой 1,2 м засыпался песок и цветной материал (мел) с шагом 100 мм и уплотнялся каждый слой. На поверхность засыпанного песка были установлены штампы Ø 800 мм с домкратами и смонтирована реперная система с прогибомерами для измерения перемещения штампа. Перед испытаниями была определена плотность засыпанного в бочки песка, которая составила 1,658 г/см<sup>3</sup> в Бочке №1 и 1,661 г/см<sup>3</sup> в Бочке №2. Для измерения изменения усилия, а также перемещения грунтовых масс, в Бочки были установлены мессдозы и глубинные марки.

Через несколько суток после нагнетания материала в Бочки было проведено испытание затвердевшего геополимера путем передачи на него ступенчатой нагрузки и фиксирования осадок.

Примечания к схеме:

В Бочке №1: Мессдозы №155, 192 и 195 – поверхностные, под штампом; Мессдозы № 157 и 627 – на глубине 40 см; Мессдозы № 160 и 628 – на глубине 80 см; т. 1, 2, 3 и 4 – точки нивелирования (1 и 2 – глубинные марки; 3 и 4 – на штампе).

В Бочке №2: Мессдозы № 193 и 194 – поверхностные, под штампом; Мессдозы № 196 и 626 – на глубине 40 см; Мессдозы № 156 и 622 – на глубине 80 см; т. 1, 2, 3 и 4 – точки нивелирования (1 и 3 – глубинные марки; 2 и 4 – на штампе).



### 3. Описание эксперимента:



Общий вид испытаний



## 4. Ход эксперимента по нагнетанию геополимерных смол:

- Установка мессдоз непосредственно под штамп, а также на глубину 40 см и 60 см;
- Установка грунтовых марок (1 шт на глубине 40 см и 1 шт на глубину 80 см);
- Монтаж стенда (упорная балка, домкрат, штамп). Установка прогибомеров;
- Забивка в Бочки представителями компании URETEK двух инъекторов для нагнетания геополимерных смол на глубину 60 см и 100 см;
- Снятие нулевых показаний;
- Передача на домкрат первой степени нагрузки, равной 23 т и снятие показаний по прогибомерам и мессдозам;
- Увеличение нагрузки до 26 т (вторая степень) и снятие всех показаний;
- 1-й этап нагнетания саморасширяющихся геополимерных смол весом 7 кг (для Бочки №1) и 9,5 кг (для Бочки №2) на глубину 60 см через инъекционную трубку. Частичная стабилизация осадок. Возрастание нагрузки в домкрате до 46 т, вследствие инъектирования геополимера. Снятие всех показаний;
- 2-й этап нагнетания саморасширяющихся геополимерных смол весом 33 кг (для Бочки №1) и 25 кг (для Бочки №2) на глубину 100 см. Поднятие грунта. Возрастание нагрузки в домкрате до 69 т;
- Снятие показаний через 60 минут после окончания эксперимента.

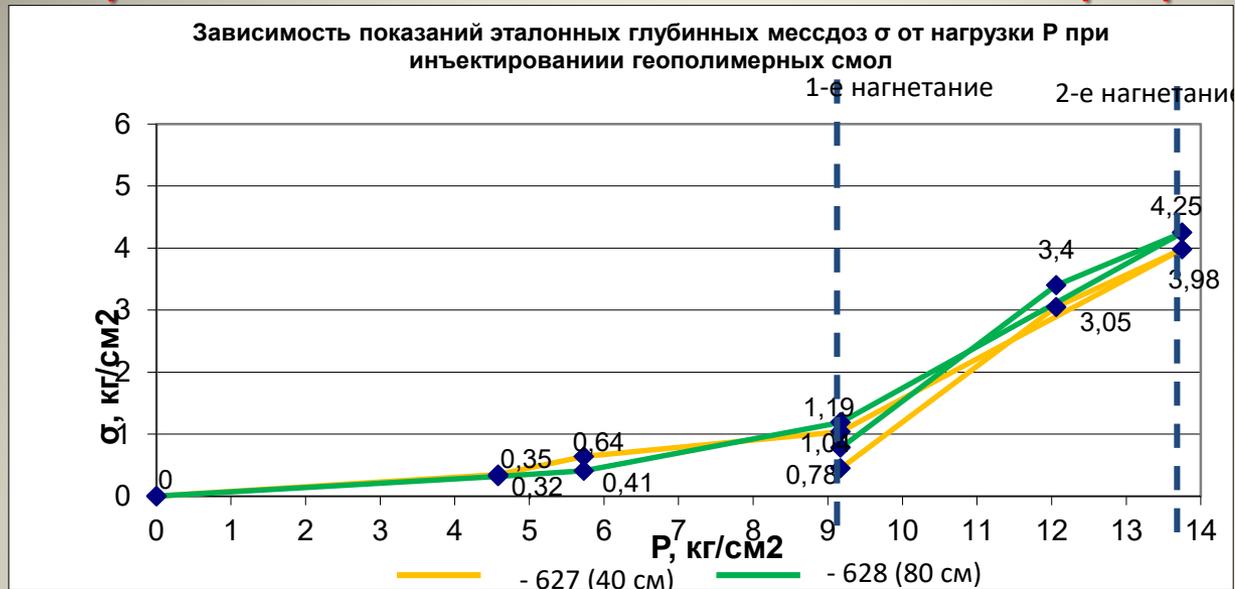


## 5. Результаты испытаний в Бочке №1:

- Напряжение в месдозах возрастает по мере увеличения нагрузки на штамп и последующим нагнетанием геополимерных смол в систему. В интервале времени от нуля до 1-го нагнетания (давление в системе от 0 до 46 т) напряжения на разных глубинах оказались практически одинаковыми, с небольшим преобладанием напряжений на глубине 40 см. В интервале же от 1-го до 2-го нагнетания геополимерных смол (от 46 до 69 т) напряжения резко возрастают и преобладают те, которые возникают на глубине 80 см. При этом напряжения под штампом не учитываются, в виду выведения поверхностных месдоз из строя.
- После приложения нагрузки 26 т осадка штампа составила 7,2 мм. После двух этапов нагнетания геополимерных смол конечная осадка штампа составила 0,2 мм, т.е. практически достигла «нулевых» значений. Однако спустя час отдыха системы осадки штампа вновь возросли и достигли 0,5 мм. Это свидетельствует о том, что суммарное поднятие системы с помощью двух инъекций раствора после приложения нагрузки 26 т составило 6,7 мм.
- После приложения нагрузки 26 т суммарная осадка грунтового массива на глубине 60 см составила 11 мм, а на глубине 100 см – 5 мм. 1-е инъектирование геополимерных смол на глубину 60 см повлияло лишь на грунтовый массив на соответствующей глубине, что обеспечило его поднятие на 5 мм. 2-е нагнетание геополимерных смол на глубину 100 см повлияло на грунтовый массив как на глубине 60 см, обеспечив ему поднятие еще на 5 мм, так и на грунт на глубине 100 см, обеспечив последнему подъем на 17 мм. Таким образом, после двух этапов нагнетания геополимерных смол и отдыха системы верхний грунтовый массив практически достиг «нулевых» значений (суммарная осадка составила лишь 2 мм), в то время как у нижнего массива зафиксировалось поднятие на 10 мм.



## 5. Результаты испытаний в Бочке №1 в графическом виде:

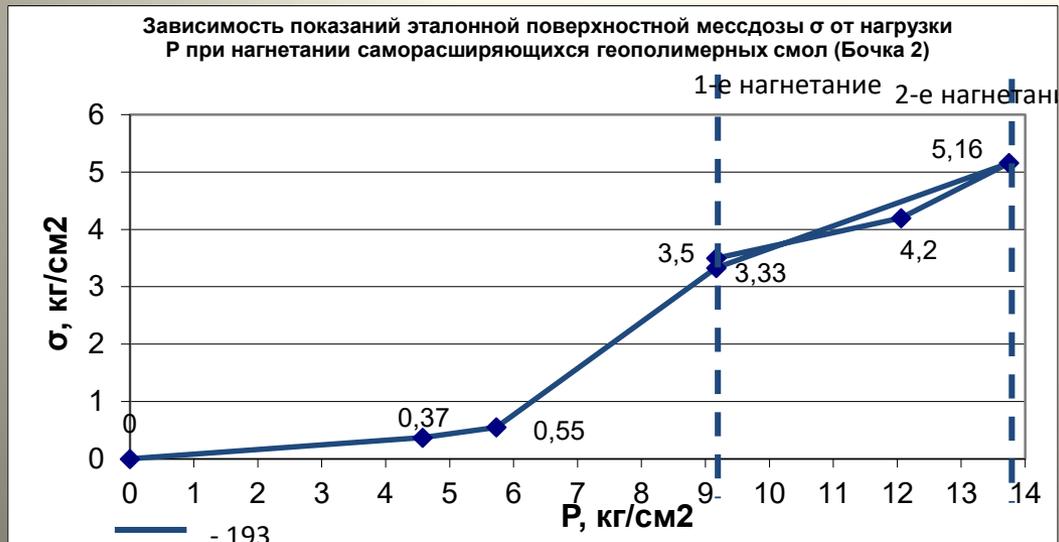
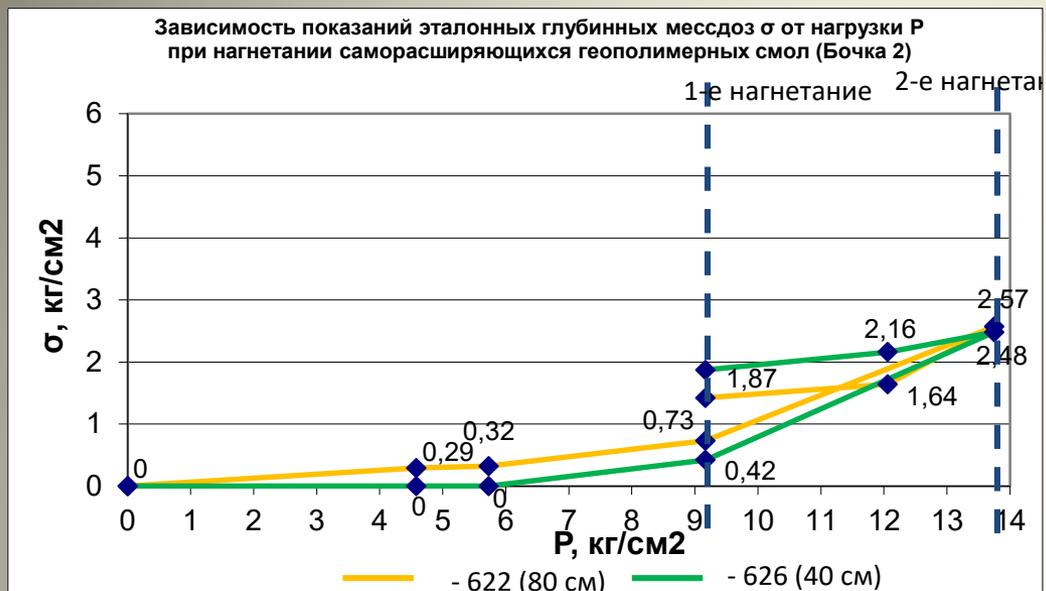


## 6. Результаты испытаний в Бочке №2 и их сравнение с результатами в Бочке №1:

- Напряжение в месдозах возрастает по мере увеличения нагрузки на штамп и последующим нагнетанием геополлимерных смол в систему. В интервале времени от нуля до 1-го нагнетания (давление в системе от 0 до 46 т) разница между напряжениями на глубине 40 см и 80 см достаточно велика. Вплоть до 1-го этапа нагнетания геополлимерных смол напряжения на глубине 40 см не выявлялись, что свидетельствует о незначительном влиянии нагружения на данные месдозы, в то время как на глубине 80 см напряжения достигали значений, меньших, чем при испытании Бочки №1. При этом в интервале от 1-го до 2-го нагнетания геополлимерных смол (от 46 до 69 т) напряжения возрастали более плавно и преобладали также те, которые возникали на глубине 80 см. Однако при разгрузке системы конечные напряжения достигали больших значений на глубине 40 см.
- В то же время напряжения под штампом до момента 1-го нагнетания также не имеют существенных различий между глубинными напряжениями. Однако как только в систему был подан материал, напряжения под штампом в интервале от 1-го до 2-го нагнетания геополлимерных смол резко возрастают и в 2 раза превосходят глубинные напряжения
- После приложения нагрузки 26 т осадка штампа составила 8,2 мм. После двух этапов нагнетания геополлимерных смол конечная осадка штампа составила 0,1 мм, т.е. также достигла «нулевых» значений. Однако спустя час отдыха системы осадки штампа возросли на 0,5 мм и в финале достигли 0,6 мм. Это указывает на то, что суммарное поднятие системы с помощью двух этапов нагнетания после приложения нагрузки 28 т составило 7,6 мм.
- После приложения нагрузки 26 т суммарная осадка грунтового массива на глубине 60 см составила 11 мм, а на глубине 100 см – 12 мм. 1-е инъектирование геополлимерных смол на глубину 60 см повлияло также как и при испытаниях Бочки №1 только на грунтовой массив на соответствующей глубине, что обеспечило его поднятие на 5 мм. 2-е нагнетание на глубину 100 см повлияло на грунтовой массив как на глубине 60 см, обеспечив ему поднятие еще на 9 мм, так и на грунт на глубине 100 см, обеспечив последнему подъем на 7 мм. Таким образом, после двух этапов нагнетания геополлимерных смол и отдыха системы верхний грунтовой массив поднялся на 2 мм, в то время как суммарная осадка нижнего массива достигла целых 6 мм.



## 6. Результаты испытаний в Бочке №2 в графическом виде



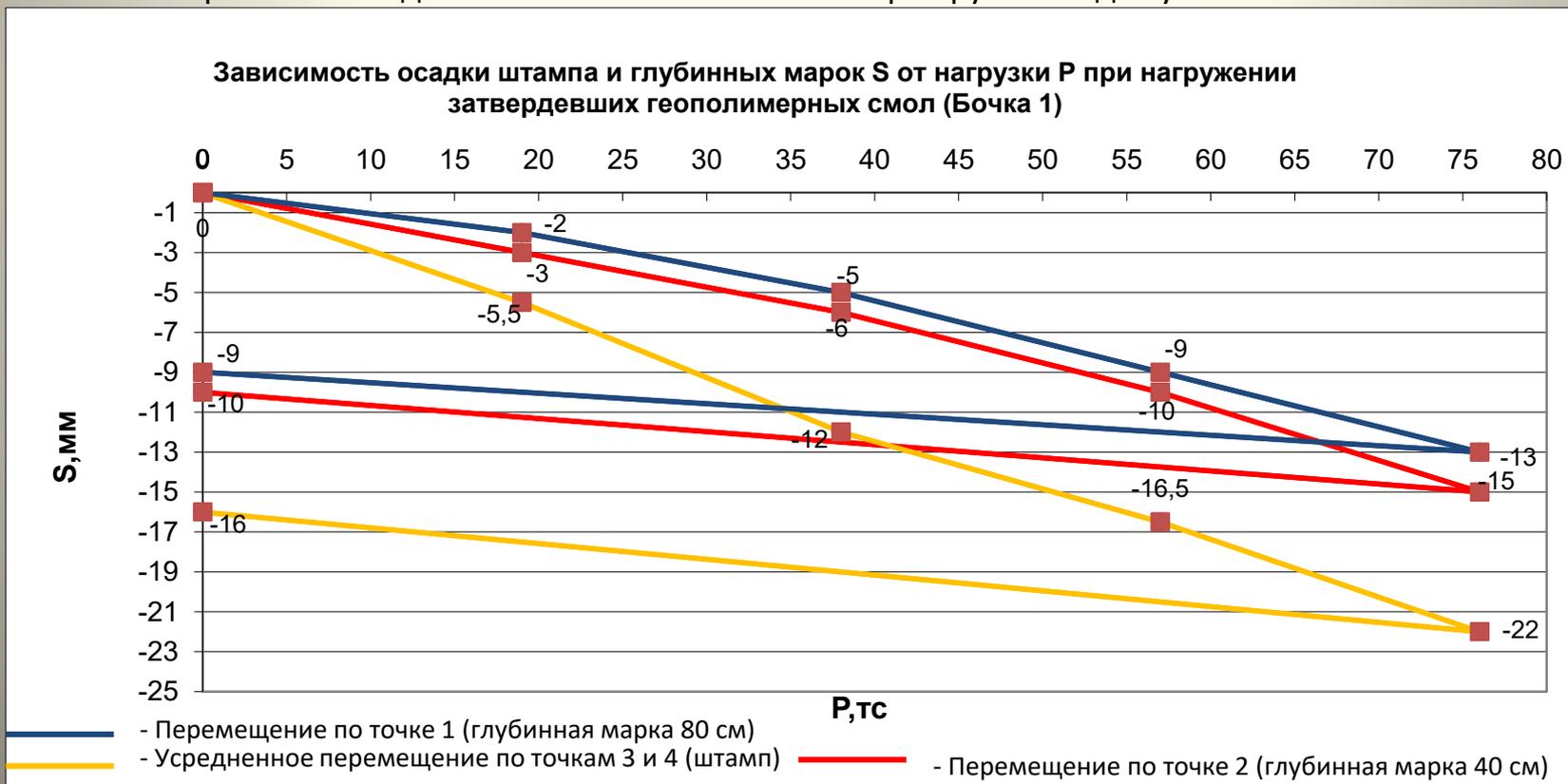
## 7. Ход эксперимента по статическому нагружению затвердевших геоплимерных смол:

- Фиксация осадок производилась с помощью нивелира по 4-м точкам (2 точки на штампе, 1 шт на глубине 40 см и 1 шт на глубине 80 см).
- Снятие нулевых показаний;
- Передача на домкрат 1-й ступени нагрузки, равной 19 т и снятие показаний по нивелиру и мессдозам;
- Выдержка ступени 20 минут;
- Передача на домкрат 2-й ступени нагрузки, равной 38 т и снятие показаний по нивелиру и мессдозам;
- Выдержка ступени 20 минут;
- Передача на домкрат 3-й ступени нагрузки, равной 57 т и снятие показаний по нивелиру и мессдозам;
- Выдержка ступени 20 минут;
- Передача на домкрат 4-й ступени нагрузки, равной 76 т и снятие показаний по нивелиру и мессдозам;
- Выдержка ступени 20 минут;
- Снятие всей нагрузки и фиксация показаний по нивелиру и мессдозам.

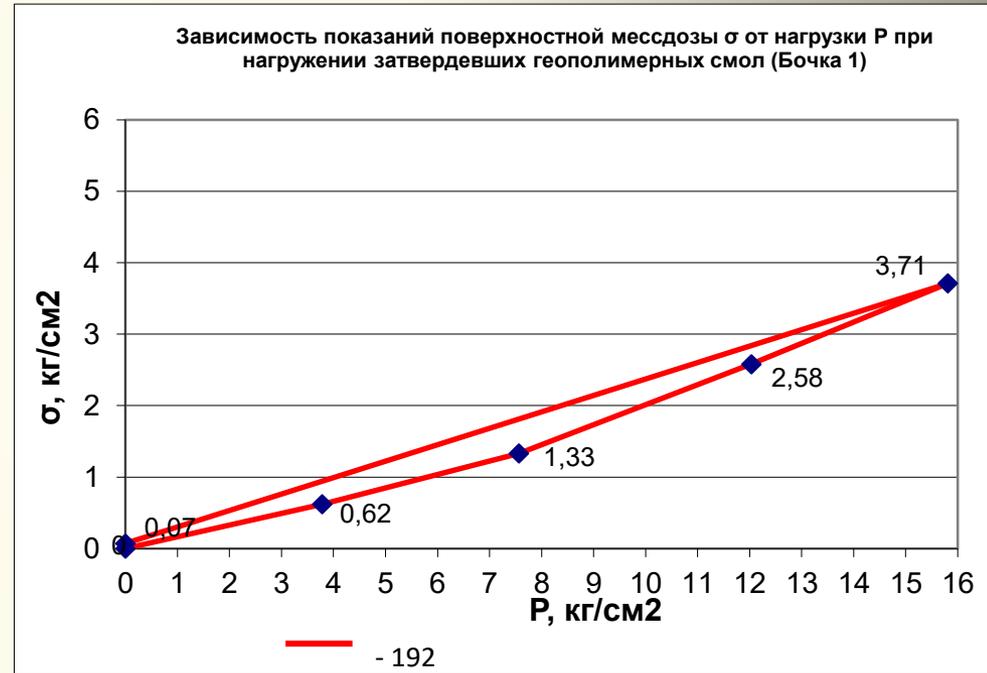
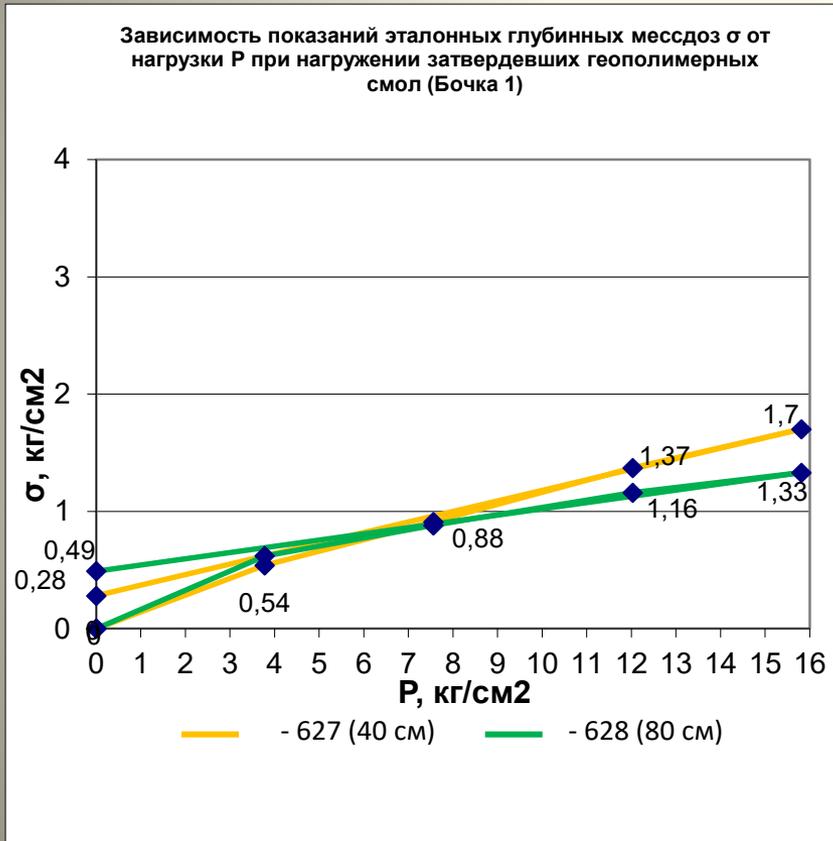


## 8. Результаты испытаний в Бочке №1:

- Напряжение в месдозах возрастает практически линейно по мере увеличения нагрузки на штамп. При этом значения напряжений на глубине 40 см в основном превышают значения напряжений на глубине 80 см на тех же ступенях нагрузок. При разгрузке конечные напряжения на глубине не достигают «нулевых» значений. Напряжения под штампом в интервале нагрузки от 38 до 76 т в 1,5÷2 раза превышают глубинные напряжения и при разгрузке практически достигают нуля.
- Средняя осадка штампа при испытаниях в 2÷3 раза превышает осадки грунтового массива, измеренные с помощью глубинных марок. При этом осадки массива грунта на глубине 40 и 80 см имеют практически одинаковые значения. После же разгрузки осадки уменьшились на 30%.



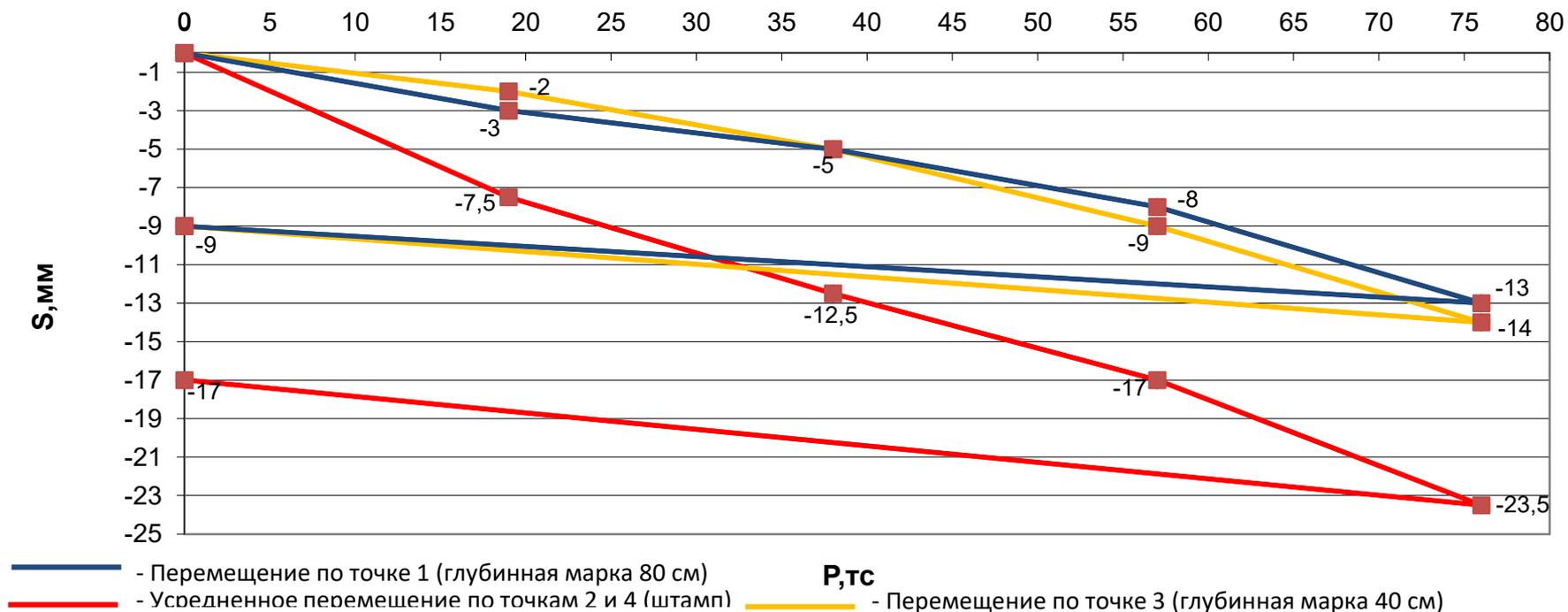
## 8. Результаты испытаний в Бочке №1 в графическом виде:



## 9. Результаты испытаний в Бочке №2:

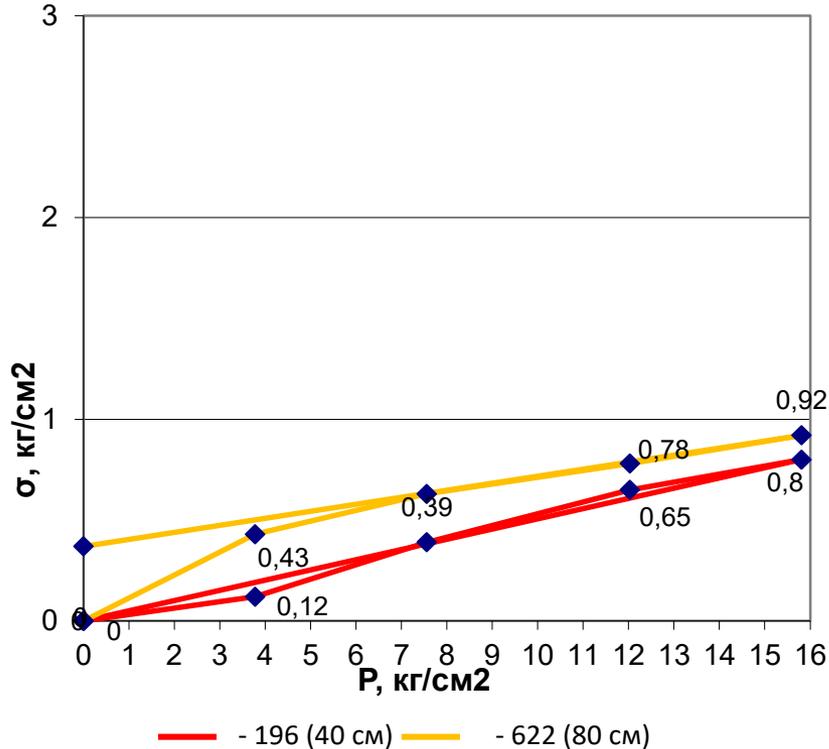
- Напряжение в месдозах возрастает практически линейно по мере увеличения нагрузки на штамп. Однако, в отличие от проведенных испытаний в Бочке №1, значения напряжений на глубине 40 см оказались меньше значений напряжений на глубине 80 см на тех же ступенях нагрузок. Также при разгрузке конечные напряжения на глубине 80 см не достигают «нулевых» значений. Напряжения же под штампом в интервале нагрузки от 38 до 76 т в 5,5÷7 раз превышают глубинные напряжения и при разгрузке достигают нулевых показаний.
- Средняя осадка штампа при испытаниях достигла больших значений, чем при испытании Бочки №1 и в среднем в 2,5 раза превышает осадки грунтового массива, измеренные с помощью глубинных марок. При этом осадки массива грунта на глубине 40 и 80 см имеют практически одинаковые значения. После же разгрузки осадки уменьшились на 30%.

Зависимость осадки штампа и глубинных марок S от нагрузки P при нагружении затвердевших геополлимерных смол (Бочка 2)

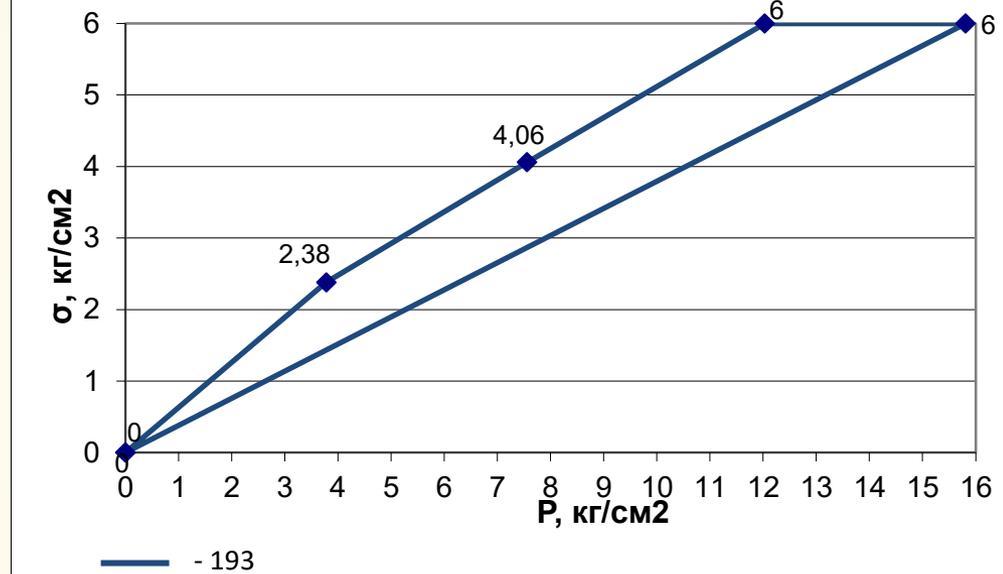


## 9. Результаты испытаний в Бочке №2 в графическом виде:

Зависимость показаний глубинных мессдоз  $\sigma$  от нагрузки  $P$  при испытании затвердевших геополлимерных смол (Бочка 2)



Зависимость показаний поверхностной мессдозы  $\sigma$  от нагрузки  $P$  при испытании затвердевших геополлимерных смол (Бочка 2)



## 10. Отбор образцов затвердевшего геополимера:



Бочка №1: толщина верхнего горизонтального гидроразрыва составила 4,5 см (при закаченых 7 кг раствора), а толщина нижнего – 12 см (при 33 кг закаченного раствора);



Бочка №2: толщина верхнего горизонтального гидроразрыва составила 6 см (при 9,5 кг закаченного раствора), а толщина нижнего – 10 см (при 25 кг закаченного раствора)

# 11. Лабораторные испытания образцов затвердевшего геополимера:

- Из Бочек были извлечены затвердевшие горизонтальные гидроразрывы из геополимерных смол, из которых были изготовлены образцы-кубики, которые затем были подвергнуты сжимающей нагрузке с помощью пресса.
- Также была определена плотность образцов из затвердевших геополимерных смол, которые находились как в замкнутом (внутри Бочек), так и в свободной расширении. Для этого из каждой Бочки было отобрано по 4 кубических образца (также из затвердевшей геополимерной смолы, находившейся в свободном расширении, было отобрано 3 кубика), затем замерялся размер и высчитывался объем каждого образца, а потом данные образцы были взвешены на высокоточных электронных весах.
- Плотность образцов высчитывалась исходя из формулы  $\rho = \frac{m}{V}$ , где  $m$  – масса образца, гр;  $V$  – объем образца, см<sup>3</sup>.
- Из-за малой толщины верхних гидроразрывов все кубы отбирались из нижних гидроразрывов каждой Бочки.

Плотность затвердевших геополимерных смол из Бочки №1

№ образца	Масса образца $m$ , гр	Объем образца $V$ , см <sup>3</sup>	Плотность образца $\rho$	
			г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
1	130	140,6	0,92	920
2	120	274,6	0,43	430
3	135	274,6	0,49	490
4	150	125	1,2	1200
Средняя плотность $\rho = 0,76$ г/см <sup>3</sup> = 760 кг/м <sup>3</sup>				

Плотность затвердевших геополимерных смол из Бочки №2

№ образца	Масса образца $m$ , гр	Объем образца $V$ , см <sup>3</sup>	Плотность образца $\rho$	
			г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
1	130	148,8	0,87	870
2	120	274,6	0,43	430
3	135	125	1,08	1080
4	150	117,6	1,27	1270
Средняя плотность $\rho = 0,91$ г/см <sup>3</sup> = 910 кг/м <sup>3</sup>				

Плотность затвердевших геополимерных смол в свободном расширении

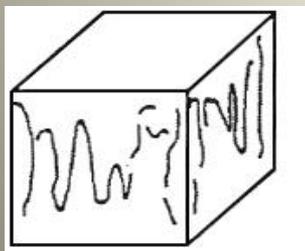
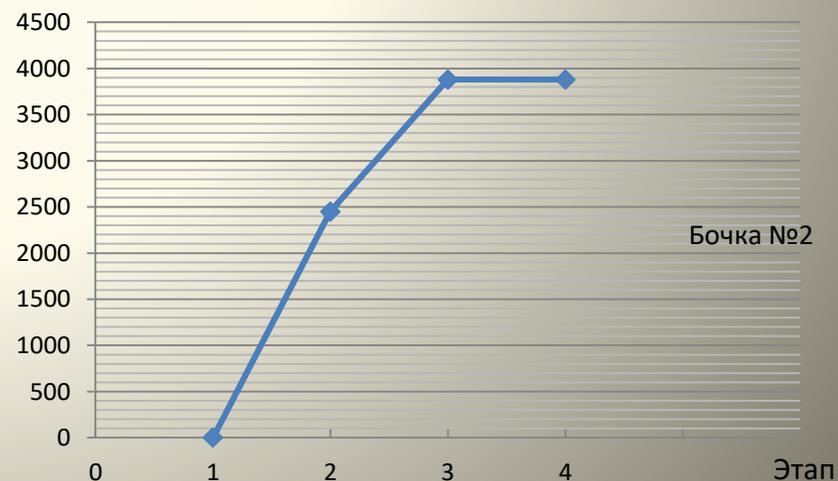
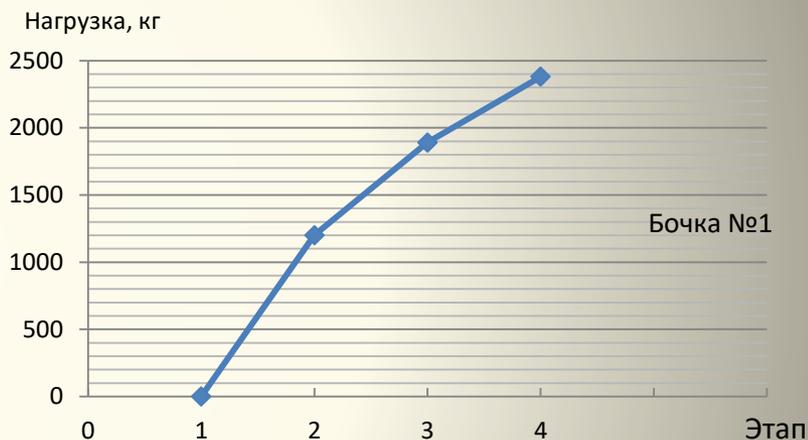
№ образца	Масса образца $m$ , гр	Объем образца $V$ , см <sup>3</sup>	Плотность образца $\rho$	
			г/см <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
1	22,5	421,9	0,053	53
2	30,8	729	0,042	42
3	17,5	343	0,051	51
Средняя плотность $\rho = 0,048$ г/см <sup>3</sup> = 48 кг/м <sup>3</sup>				

Плотность образца затвердевшей в свободном расширении смолы в 15-19 раз меньше ее же плотности в «зажатом» состоянии.



# 11. Лабораторные испытания образцов затвердевшего геополимера:

- После определения плотности образцов, они были испытаны на сжатие. Образец нагружали до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки ( $0,6 \pm 0,2$ ) МПа/с.
- Испытания образцов, отобранных из Бочки №1: полное разрушение испытуемого образца наступает при нагрузке, равной 2,38 т. Первая трещина в образце появляется при нагрузке, равной 1,2 т, а сквозная трещина образуется при 1,89 т.
- Испытания образцов, отобранных из Бочки №2: появление сквозной трещины и полное разрушение испытуемого образца наступает при нагрузке, равной 3,88 т. Первая трещина в образце появляется при нагрузке, равной 2,45 т.



Этап 1 – начало испытаний; Этап 2 – появление трещины; Этап 3 – образование сквозной трещины; Этап 4 – полное разрушение образца.

Характерное разрушение при сжатии

## 12. Определение деформационных характеристик образцов затвердевшего геополимера и исследование его долговечности:

Испытания проведены с помощью гидравлического пресса, который мог создать максимальную нагрузку до 3 тс. На каждой ступени после регистрации деформаций осуществлялась разгрузка до нуля. Ступени нагрузок – 500 кг. На каждой ступени регистрировались полные, остаточные и упругие деформации.

Испытания показали, что первоначальный модуль деформации геополимера изменяется в продольном направлении имеет минимальное значение, равное 17,5 МПа, а максимальное – 50,2 МПа.

В рамках выполнения работ по опытному нагнетанию расширяющегося полимера URETEK на основании хранения затвердевших образцов более 1 года, можно сделать следующие выводы:

При повторных испытаниях образцов-кубов через 1 год модуль деформации полимера изменялся от 34,9 до 58,5 МПа.

Таким образом, жесткость полимера в течение 1 года не уменьшилась.

Также исследования, проведенные Allard van der Wal (Нидерланды, 2010 г), позволяют сделать следующие выводы:

1. При уровнях напряжения, равных 25% от прочности на сжатие, ползучесть материала незначительна. Происходит поглощение воды. Тем не менее это не приводит к значительному ухудшению механических свойств. Не наблюдается никакого ухудшения характеристик от действия бактерий или грибов. Четырехлетние испытания по хранению образцов под землей не выявили ухудшения их характеристик.

2. На основании испытаний на долговечность и ускоренных испытаний на срок службы полиуретана можно предположить, что срок его службы превосходит срок эксплуатации зданий более, чем на 60 лет. Метод "Юритек" используется с середины 1970-х годов. На основании подобного опыта мы можем установить срок службы, равный не менее 35 лет. Ускоренные испытания на срок службы не зафиксировали какого-либо значительного ухудшения характеристик. На основании этих результатов мы предполагаем, что срок службы материала "Юритек" превысит 60 лет.

system	density [kg/m <sup>3</sup> ]	Waterabsorption [wt%]	comp. Strength before [kPa]	comp. Strength after [kPa]
1735	104	22,3	890	892
	146	11,4	1661	1788
	208,2	14,6	3514	3485
2435	113	15,3	1268	1176
	116	14	1442	1207

**Table 1:** Effect of water absorption on the compressive strength, for different systems [Uretek Resin 1735 and Uretek Resin 2435] at different densities [104 – 208 kg/m<sup>3</sup>].



# 13. Лабораторные испытания образцов песка из Бочек:

- Для определения плотности уплотнено-деформированного песка за счет нагнетания саморасширяющихся геополлимерных смол были отобраны пробы методом режущего кольца, в соответствии с ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».
- Плотность грунта определялась отношением массы образца грунта к его объему. Параметры кольца-пробоотборника:  $\varnothing 70$  мм. Н= 50 мм.
- Определение объема по формуле:  $V = \pi R^2 H = 192,4$  см<sup>3</sup>

**Вес отобранных образцов грунта в Бочке №1.**

Номер слоя (отбор производил ся сверху вниз)	Масса отобранных образцов грунта, гр
<b>Отобранный образец перед началом испытаний</b>	
Слой 0	319,01
<b>Отобранные образцы после проведения испытаний</b>	
Слой 1	321,03
Слой 2	321,93
Слой 3	329,52
Слой 4	328,98
Слой 5	349,25
Слой 6	357,25
Слой 7	358,66

**Вес отобранных образцов грунта в Бочке №2.**

Номер слоя (отбор производился сверху вниз)	Масса отобранных образцов грунта, гр
<b>Отобранный образец перед началом испытаний</b>	
Слой 0	319,58
<b>Отобранные образцы после проведения испытаний</b>	
Слой 1	322,02
Слой 2	324,14
Слой 3	331,33
Слой 4	330,98
Слой 5	339,78
Слой 6	359,17
Слой 7	361,01
Слой 8	360,86
Слой 9	360,99



# 13. Лабораторные испытания образцов песка из Бочек:

- Плотность грунта  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>, вычисляли по формуле  $\rho = (m_1 - m_0 - m_2) / V$   
 где :  $m_1$  - масса кольца, г;  
 $m_0$  - масса грунта с кольцом и пластинками, г;  
 $m_2$  - масса пластинок, г;  
 $V$  - внутренний объем кольца, см<sup>3</sup>.

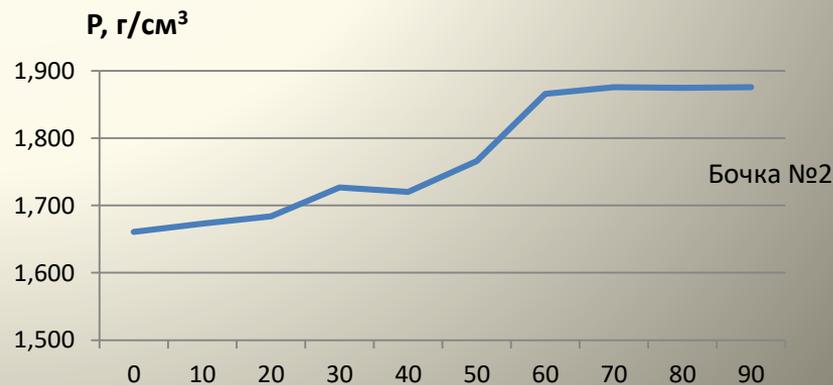
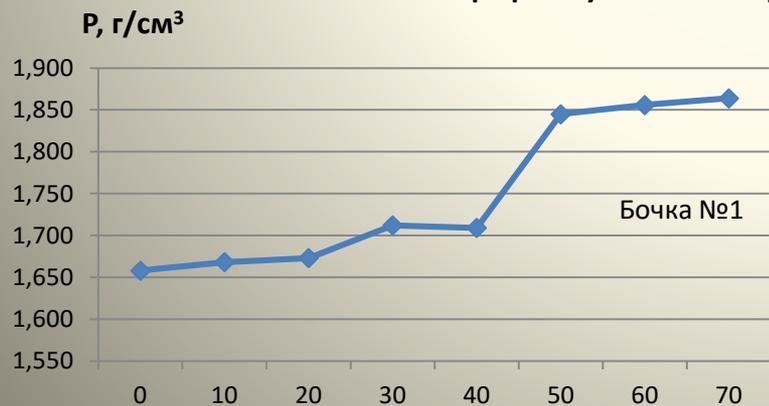
**Плотность отобранных образцов грунта из Бочки №1.**

Номер слоя (отбор производился сверху вниз)	Плотность отобранных образцов грунта (г/см <sup>3</sup> )
<b>Отобранный образец перед началом испытаний</b>	
Рн	1,658
<b>Отобранные образцы после проведения испытаний</b>	
Р <sub>1</sub>	1,668
Р <sub>2</sub>	1,673
Р <sub>3</sub>	1,712
Р <sub>4</sub>	1,709
Р <sub>5</sub>	1,845
Р <sub>6</sub>	1,856
Р <sub>7</sub>	1,864

**Плотность отобранных образцов грунта из Бочки №2.**

Номер слоя (отбор производился сверху вниз)	Плотность отобранных образцов грунта (г/см <sup>3</sup> )
<b>Отобранный образец перед началом испытаний</b>	
Рн	1,661
<b>Отобранные образцы после проведения испытаний</b>	
Р <sub>1</sub>	1,673
Р <sub>2</sub>	1,684
Р <sub>3</sub>	1,727
Р <sub>4</sub>	1,720
Р <sub>5</sub>	1,766
Р <sub>6</sub>	1,866
Р <sub>7</sub>	1,876
Р <sub>8</sub>	1,875
Р <sub>9</sub>	1,876

**Графики уплотнения грунта по глубине (см).**



# 13. Лабораторные испытания образцов песка из Бочек:

- После определения веса и плотности грунта песчаный образец испытывали на нагрузку и компрессионном приборе для определения его деформационных характеристик. Максимальная нагрузка, приложенная к образцу достигала 10 кг (или 1,99 кг/см<sup>2</sup>).
- Нагружение производилось ступенями по 1 кг.
- Время выдержки на каждой ступени составляло минимум 15 минут.

исходные данные:

2180 г – вес без песка

2380 г – вес с песком

200 г – вес песка.

5 - 6% влажности.

Время	Время ступени	Нагрузка, кг	Давление, кг/см <sup>2</sup>	S <sub>1</sub> , мм	S <sub>2</sub> , мм	S <sub>ср</sub> , мм
0	0	0	0	0	0	0
14:00	0	1	0,165	0,01	0,01	0,01
14:15	15	1	0,165	0,01	0,01	0,01
14:15	0	2	0,331	0,03	0,02	0,025
14:30	15	2	0,331	0,03	0,02	0,025
14:30	0	3	0,497	0,04	0,03	0,035
14:45	15	3	0,497	0,04	0,03	0,035
14:45	0	4	0,663	0,05	0,035	0,042
15:00	15	4	0,663	0,05	0,035	0,042
15:00	0	5	0,828	0,06	0,05	0,055
15:15	15	5	0,828	0,07	0,05	0,06
15:30	30	5	0,828	0,07	0,05	0,06
15:30	0	6	0,994	0,08	0,06	0,07
15:45	15	6	0,994	0,08	0,06	0,07
15:45	0	7	1,39	0,09	0,07	0,08
16:00	15	7	1,39	0,09	0,07	0,08
16:00	15	8	1,597	0,1	0,08	0,09
16:15	0	9	1,797	0,1	0,09	0,095
16:30	15	9	1,797	0,11	0,09	0,1
16:45	30	9	1,797	0,11	0,1	0,105
17:00	45	9	1,797	0,11	0,1	0,105
17:00	0	10	1,99	0,11	0,1	0,105
17:30	30	10	1,99	0,11	0,11	0,11

На основании полученных результатов вычислялась относительная деформация и модуль деформации образца грунта:  $\Delta \epsilon_1 = \frac{\Delta S}{S} = \frac{0,11}{25} = 0,0044$ , где  $\Delta S$  – сжатие образца грунта;  $S$  – высота штампа.

Модуль деформации:  $E_1 = \frac{\sigma}{\Delta \epsilon_1} \beta = \frac{1,99}{0,0044} \cdot 0,74 = 334,7 \text{ кг/см}^2 = 33,5 \text{ МПа}$ , где  $\beta$  – коэффициент, равный 0,74 для песков.

Определялся коэффициент пористости грунта, исходя из формулы:

$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{S_i}{h}$ , где  $e_0 = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$  – начальный коэффициент пористости;  $S_i$  – деформация образца, мм;  $h$  – высота образца, мм;  $\rho_s$  – плотность частиц грунта (для песков 2,66 г/см<sup>3</sup>);

$\rho_d = \frac{\rho}{1+W}$  – плотность сухого грунта, г/см<sup>3</sup>;  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{20,4}{13,56} = 1,504 \text{ г/см}^3$  – плотность грунта;

$W = 6\%$  – влажность грунта.

Тогда  $\rho_d = \frac{\rho}{1+W} = \frac{1,504}{1+0,01 \cdot 6} = 1,42 \text{ г/см}^3$

$e_0 = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} = \frac{2,66 - 1,42}{1,42} = 0,873$

На основании вычисленного  $e_0$  определялись коэффициенты пористости на ступенях нагрузки 2 кг, 4 кг, 6 кг, 8 кг и 10 кг:

$e_{2\text{кг}} = e_0 - (1 + e_0) \frac{S_{2\text{кг}}}{h} = 0,873 - (1 + 0,873) \frac{0,025}{25} = 0,871$ ;

$e_{4\text{кг}} = e_0 - (1 + e_0) \frac{S_{4\text{кг}}}{h} = 0,873 - (1 + 0,873) \frac{0,042}{25} = 0,869$ ;

$e_{6\text{кг}} = e_0 - (1 + e_0) \frac{S_{6\text{кг}}}{h} = 0,873 - (1 + 0,873) \frac{0,07}{25} = 0,867$ ;

$e_{8\text{кг}} = e_0 - (1 + e_0) \frac{S_{8\text{кг}}}{h} = 0,873 - (1 + 0,873) \frac{0,09}{25} = 0,866$ ;

$e_{10\text{кг}} = e_0 - (1 + e_0) \frac{S_{10\text{кг}}}{h} = 0,873 - (1 + 0,873) \frac{0,11}{25} = 0,864$ .



После испытаний плотность грунта увеличивалась по мере увеличения глубины, с которой отбирались образцы. Причем на небольшой глубине плотность увеличивается достаточно плавно, затем происходит резкий скачок в ее росте на глубине 40-50 см (примерно на 0,1÷0,14 г/см<sup>3</sup>), после чего рост плотности вновь становится линейным. При этом максимальная плотность грунта, зафиксированная на дне бочек, выросла на 12÷13% по сравнению с начальной плотностью грунта.

Коэффициент пористости исследуемого песка при его нагружении до 1,99 кг/см<sup>2</sup> линейно уменьшался от 0,873 до 0,864, что соответствует его падению всего на 1%.

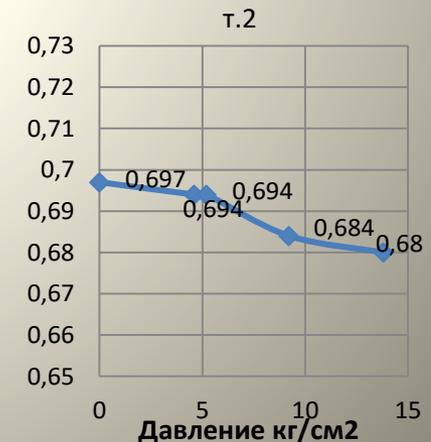
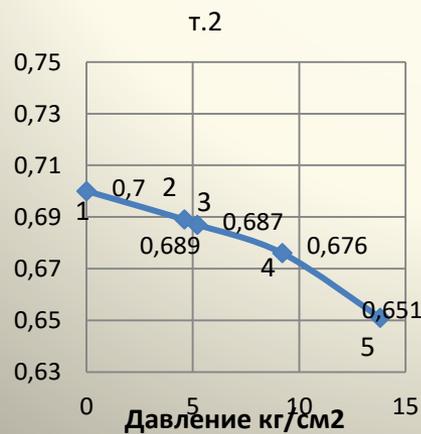
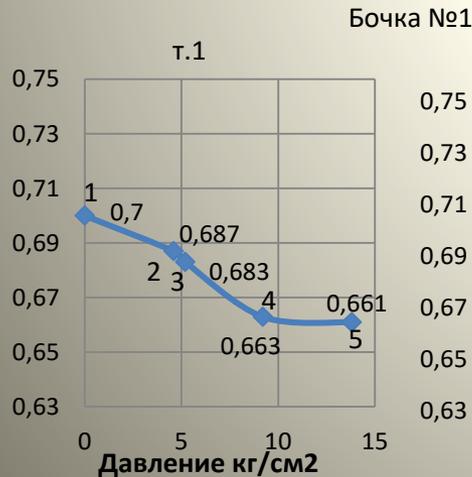
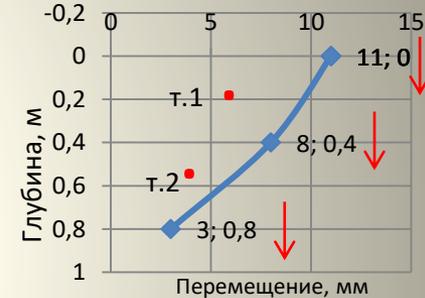
Начальным модулем деформации песка принимается его значение 33,5 МПа.

# 14. Определение деформационных характеристик грунта в процессе нагнетания геополимерных смол:

- Модуль деформации грунта  $E$  в каждой Бочке вычисляется в двух точках: на глубине 20 см (точка 1 - между штампом и мессдозой, погруженной на 40 см) и на глубине 60 см (точка 2 - между мессдозами, погруженными на 40 и 80 см).
- Расчет модуля деформации грунта производился на основании вычисления разницы давлений между ступенями нагрузок, а также разницы перемещений грунта между двумя точками: для т.1 - разница между значениями деформаций грунта под штампом и на глубине 40 см, а для т.2 - разница между значениями перемещений грунта на глубине 40 и 80 см.
- Для каждой ступени нагрузки вычислялся коэффициент пористости грунта на глубинах, соответствующих глубине залегания т.1 и т.2.
- Общие данные:
- Площадь штампа:  $F = 0,5 \text{ м}^2$ ; Переводной коэффициент, необходимый для перехода от горизонтальных напряжений к вертикальным:  $\xi = 0,37$ ; Коэффициент, зависящий от типа грунта (в данном случае пески):  $\beta = 0,74$ ; Влажность песка:  $W = 6\%$ .

На основании расчетов можно сделать следующие выводы:

- Модуль деформации грунта в процессе нагнетания геополимера изменяется от 37,6 до 50,5 МПа.
- Коэффициент пористости грунта уменьшается на каждом этапе изменения давления в системе. Начальный коэффициент пористости  $e_0$  был равен: 0,700 – для Бочки №1 и 0,697 – для Бочки №2. При этом в Бочке №1 в т.1 (глубина 20 см) наблюдается резкое уменьшение коэффициента пористости при 1-м нагнетании геополимерных смол, и небольшое его изменение при 2-м нагнетании, в то время как в т.2 (глубина 60 см) наоборот, при 1-м нагнетании смол график носит линейный характер, а при 2-м инъектировании коэффициент пористости резко уменьшается.
- Однако в Бочке №2 результаты оказались другими: в т.1 при 1-м нагнетании геополимерных смол график носит линейный характер, а при 2-м нагнетании коэффициент пористости уменьшается более резко. При этом наблюдается резкое падение значения коэффициента пористости при увеличении нагрузки в системе до 26 т (Этап 2). В т.2 коэффициент пористости изменяется более-менее линейно и не имеет никаких резких изменений.



# 15. Определение деформационных характеристик грунта при испытании затвердевших геополлимерных смол:

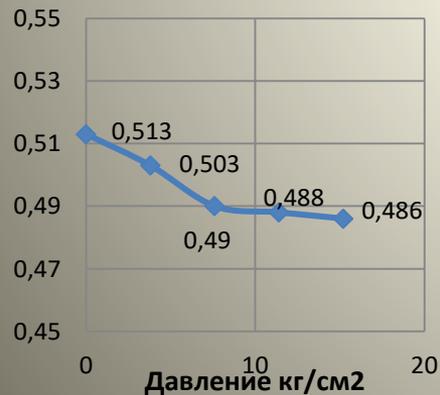
- Характерным отличием от порядка испытаний, приведенного ранее, является то, что при испытании затвердевших геополлимерных смол на штампы с домкратами передавалась нагрузка четырьмя ступенями по 19 т до максимальной нагрузки, равной 79 т. Порядок определения модуля деформации и коэффициента пористости грунта остается аналогичным описанному на предыдущих страницах.
- Общие данные: Площадь штампа:  $F = 0,5 \text{ м}^2$ ; Переводной коэффициент, необходимый для перехода от горизонтальных напряжений к вертикальным:  $\xi = 0,37$ ; Изменение давления:  $\Delta p = 19 \text{ т}$ ; Коэффициент, зависящий от типа грунта (в данном случае песка):  $\beta = 0,74$ ; Влажность песка:  $W = 6\%$ .

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

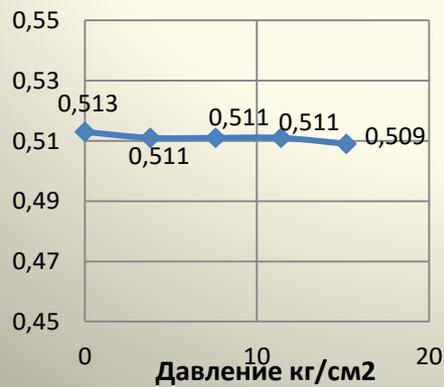
- Модуль деформации грунта при испытании затвердевшего полимера изменяется от 48,5 до 93,4 МПа.
- Коэффициент пористости грунта уменьшается на каждом этапе изменения давления в системе. Начальный коэффициент пористости  $e_0$  был равен: 0,513 – для Бочки №1 и 0,503 – для Бочки №2. Расчеты показали примерно одинаковую зависимость изменения коэффициента пористости грунта в обеих Бочках. Так, в т.1 сильное уменьшение данных характеристик происходит лишь на первых двух ступенях нагрузки, а затем на нагрузках 57 и 76 т коэффициент пористости уменьшается в предельно малых значениях.
- В т.2 изменения коэффициента пористости грунта практически не происходит. За все время испытаний в Бочке №1 коэффициент понизился с 0,513 до 0,509, а в Бочке №2 – с 0,503 до 0,497. Это может говорить о том, что почти всю нагрузку в Бочках на себя принимает верхний горизонтальный гидроразрыв, в то время как под него доходит ничтожно малая часть нагрузки, приложенной к системе.

## Компрессионные кривые для Бочки №1 и Бочки №2:

Бочка №1 в т.1



Бочка №1 в т.2



Бочка №2 в т.1



Бочка №2 в т.2



# 16. Расчетное обоснование технологии:

Методика и последовательность расчета подъема отдельно-стоящего или плитного фундамента на величину  $\Delta$ , м, включает построение геометрической численной модели МКЭ с заданием в ней зоны искусственного расширения геополимерного тела толщиной  $\delta$ , м.

С этой целью моделируется формирование горизонтально расширяющегося плоского полимерного тела в грунте толщиной  $\delta$ , м, размерами в плане  $a' \times b'$ , м определяемых согласно расчетной схеме. В порядке грубой оценки принимается, что активная зона расширения грунта под фундаментом ограничена объемом в пределах усеченной пирамиды с размером нижнего основания в плане  $a' \times b'$ , верхнего основания -  $a \times b$ , м, и высотой, равной  $h_3$  - глубине расположения нижнего конца инъектора для закачки состава.

На первом этапе определяется объем грунта в пределах которого происходит расширение полимера при его закачивании под фундамент на глубину  $h_3$ . В случае столчатого или плитного фундамента со средним давлением под подошвой фундамента не менее 250 кПа этот объем принимается равным объему грунта, ограниченного усеченной пирамидой, расположенной под подошвой фундамента  $V_{zp}$ . При этом, площадь верхнего основания равна  $a \times b = S$ , а площадь нижнего  $a' \times b' = S'$ . Принимаем также, что  $h = h_3$ .

Тогда объем усеченной пирамиды  $V_{zp}$  равен:  $V_{zp} = \frac{1}{3} h_3 (S + \sqrt{S \cdot S'} + S')$

Определяется возможное сокращения пористости грунта при его уплотнении за счет расширения полимера в пределах активной зоны. При известном исходном коэффициенте пористости  $\varepsilon_1$  грунта основания первоначальная пористость равна  $n_1 = \frac{\varepsilon_1}{1 + \varepsilon_1}$ . Максимально возможная плотность грунтов с коэффициентом уплотнения 0.9 под фундаментом равна  $\rho$ , коэффициент пористости, при этом, принимается равным  $\varepsilon_2$ , а пористость, соответственно, равна  $n_2 = \frac{\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_2}$ . Таким образом, максимально возможное сокращение пористости по сравнению с первоначальной составит:  $\Delta n = n_1 - n_2$ .

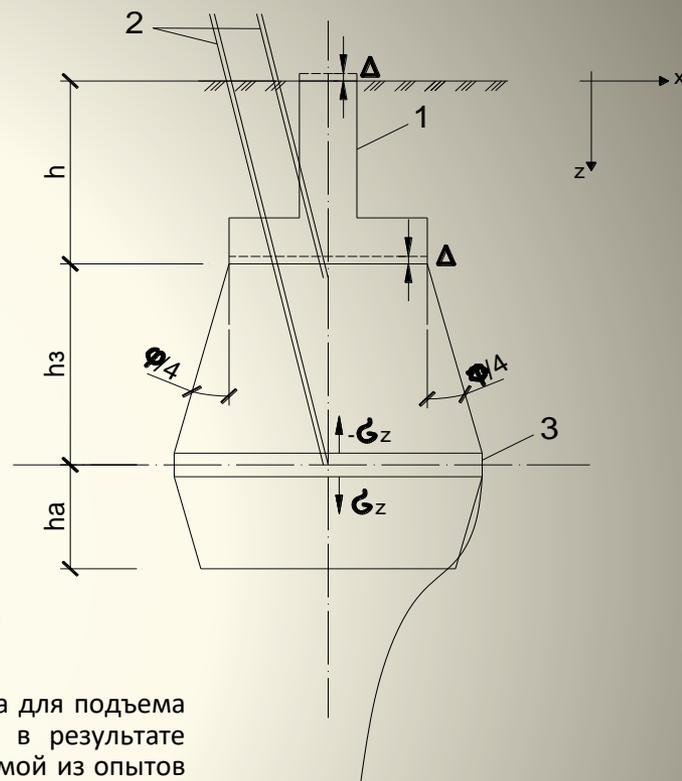
Для определения необходимого объема и толщины «тела»  $\delta$ , м, из геополимерного состава для подъема фундамента на величину  $\Delta$ , мм принимаем, что сокращение пористости происходит в результате расширения геополимера до достижения минимально возможной величины  $n_2$ , определяемой из опытов по стандартному уплотнению грунта с коэффициентом уплотнения до 0,9. Для сокращения пористости грунта на  $\Delta n$  в основании фундамента на промежутке высоты активной зоны  $h_3$  требуется получить так называемое «тело» из геополимерного состава в объеме  $V_a$ , при условии ограничения сжимаемой зоны глубиной  $h_3$  и объеме грунта внутри активной зоны  $V_{zp}$ , т.е:  $V_a = V_{zp} \cdot \Delta n$

Кроме того, требуется учесть двунаправленное воздействие распора грунта вверх и вниз от расширяющегося геополимерного состава объемом  $V_a$  и уплотнение грунта под ним на глубину активной зоны  $h_a$ . Принимается, что грунт основания под телом полимера  $V_a$  имеет те же характеристики, что и под фундаментом и что расширение полимера происходит вверх и вниз в равной мере, т.е.- двунаправленно в равном объеме. Таким образом, для создания давления, равного давлению под подошвой фундамента, требуемый объем тела за счет расширения  $V'_a$  полимера должен быть равен:  $V'_a = 2 \cdot (V_{zp} \cdot \Delta n)$

Также, требуется учесть дополнительный объем полимера для обеспечения подъема фундамента на заданную величину подъема  $\Delta$ , мм. Отсюда получаем объем тела полимера  $V_{ad}$ , а учитывая требуемый двойной объем (вверх и вниз):  $V_{ad} = 2 \cdot (\Delta \cdot S')$

Суммарный объем тела расширенного полимера:  $V'_s = V'_a + V_{ad}$

Суммарная толщина тела расширенного полимера  $\delta$ , м:  $\delta = \frac{2V_{ad} + V'_s}{2S'}$



Расчетная схема

# 16. Расчетное обоснование технологии:

Определение требуемого веса полимера для подъема фундамента на величину  $\Delta$ , мм производится исходя из ранее определенного требуемого объема полимера  $V'_s$ . Поднятие фундамента возможно, когда давление поднятия превышает давление от нагрузки, передаваемой от объекта на основание. Давление поднятия, развиваемое расширяющимся полимером в условиях его ограниченного расширения, можно определить по следующей формуле:  $P_l = \left(\frac{\rho_a}{\rho_{f.r.}} - 1\right) * 100$  кПа, где  $P_l$  – давление поднятия грунта (lifting pressure), кПа;

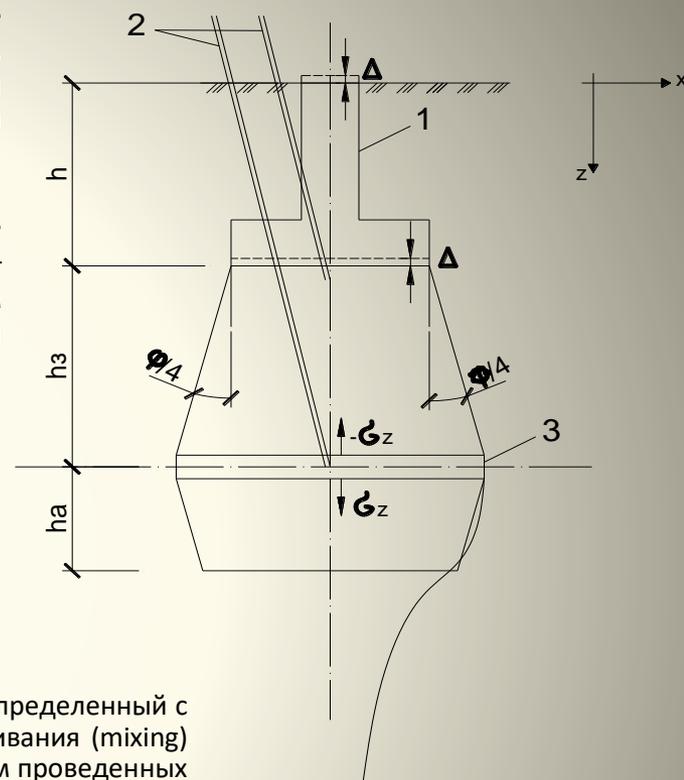
$\rho_a$  – плотность геополимерного состава в условиях ограниченного расширения в массиве грунта при действии напряжений от веса грунта и нагрузки на фундамент, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{f.r.}$  – плотность геополимерного состава в условиях свободного расширения при атмосферном давлении (ПАД), (free rise density) кг/м<sup>3</sup>. Величины ПАД и коэффициенты пенообразования для одного из видов саморасширяющихся полимеров представлены ниже:

Материал	ПАД (кг/м <sup>3</sup> )	Коэффициент пенообразования
Uretek Resin 2409	36	32
Uretek Resin 1735	56	21
Uretek Resin 0975	100	12
Uretek Resin 0687	190	6
Uretek Resin 3172	250	5.

Затем общий полный вес полимера  $w_{пол}$  определяется путем умножения  $\rho_a$  на объем  $V'_s$ , определенный с учетом коэффициента возможного смешивания  $\gamma_{mix}$  (вводится для учета возможного смешивания (mixing) геополимерного состава с грунтом в процессе инъектирования и может составлять по данным проведенных экспериментов до  $\gamma_{mix} = 50\%$  от объема полимера):  $w_{пол} = \rho_a * V'_s * \gamma_{mix}$

Расчет необходимого веса геополимера  $w_{пол}$ , инъектируемого в уплотняемый массив грунта, для достижения максимальной плотности производится по формуле:  $w_{пол} = \rho_a * \Delta n * \gamma_{mix} * l^2 * h_3$ , где  $l$  – расстояние между инъекционными трубками.

При проектировании расстояние между инъекционными трубками  $l$  с учетом надежного перекрытия геополимерных линз между собой должно приниматься в пределах 0,6 - 1,5 м и уточняться при проведении опытных работ. При проектировании следует учитывать наличие грунтовых вод и их влияние на механические характеристики продукта технологии, что следует исследовать при проведении опытных работ. Программу опытных работ должна разрабатывать специализированная организация.



Расчетная схема



# 17. Обоснование формирования горизонтального гидроразрыва:

Вопросами формирования в грунте гидроразрывов занимались Сергеев С.В.(2008), Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А.(2015), Фуминг Ванг (2017), Попсуенко И.К.(2011), и др. При формировании в грунте гидроразрывов расстояние между инъекторами, режимы инъектирования, составы инъекционных растворов или полимеров обычно назначают после выполнения опытных работ на основе эмпирических данных. При обзоре работ в данном направлении не было обнаружено попыток расчетного обоснования расстояния между инъекторами, режима инъектирования, состава инъекционных растворов при защите зданий и сооружений путем устройства геотехнического барьера. Применяется множество марок полимеров, различающихся в основном плотностью при свободном расширении, которая изменяется от 20 до 60 кг/м<sup>3</sup>.

Приведем некоторые результаты опытных работ по гидроразрыву при нагнетании растворов и полимеров.

1. Площадка строительства многоэтажного дома в г. Тула, пр. Ленина, 63 (2015 г., НИИОСП). Инъекторы глубиной 5 м расположенные на расстоянии 1 м друг от друга (диаметром 42 мм, в которых с шагом 330 мм просверлены отверстия диаметром по 6 мм, закрытые резиновыми манжетами) Погружение - в предварительно пробуренные скважины диаметром 100 мм с обойменным раствором в/ц=1,5 с добавлением бентонитового порошка 4%. Закачивание цементного раствора в/ц=0.8-1,0 с добавлением бентонитового порошка 2%. Закачено в каждое отверстие (зону) инъекторов по три цикла с количеством раствора соответственно 50 литров, 27 л, и 10 литров и давлениями соответственно циклам закачки – 0,5 МПа, 1,5 МПа и 4 МПа. После твердения раствора была откопана траншея в грунтах, прилегающих к инъекторам и вскрыто «тело» цементированного грунта. Откопка показала, что при инъектировании в режиме гидроразрыва, т.е. при давлении свыше 0,5 МПа, в грунте формируются трещины, заполненные цементационным раствором. При этом, в каждом из циклов нагнетания образуются цементационные тела - вертикальные плоскости в виде клиньев-«языков» с вертикальной ориентацией. Формирование вертикальных плоскостей-«языков» гидроразрыва происходило параллельно друг-другу в соответствии с количеством циклов нагнетания.

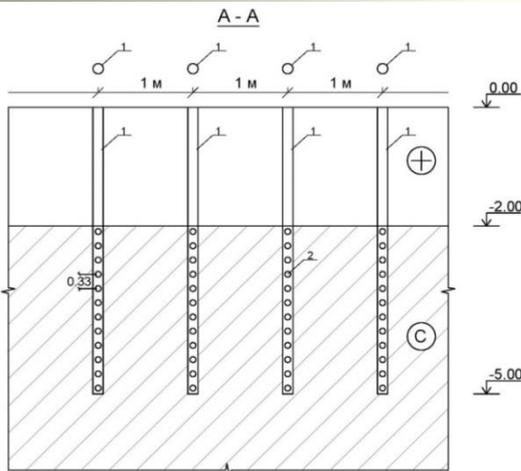


Рис. 1 Схема расположения инъекторов (1), с отверстиями и манжетами (2).  
Инженерно- геологический разрез опытной площадки в г. Тула, Ленинский проспект, 63  
⊕ - техногенные грунты  
© - покровные суглинки,  $e = 0,68$ ,  $W = 19\%$ ,  $E = 14$  МПа,  $\phi = 21^\circ$ ,  $C = 20$  КПа.



Почти во всех инъекторах происходят ортогональные «прорывы», т.е. формирование прорывов в плоскости перпендикулярной осевой линии инъекторов, однако их длина в направлении перпендикулярном плоскости, проходящей через оси инъекторов, небольшая - 200-300 мм. Образование подобной сплошной мембраны в вертикальной между инъекторами плоскости в геотехническом смысле весьма положительный и перспективный результат, имеющий множество приложений (защитные и гидрозакрепительные барьеры, армирующие грунт, уплотнение грунтов, рихтовка фундаментов, устранение пустот и пр).

# 17. Обоснование формирования горизонтального гидроразрыва:

2. В Китае исследователями Фуминг Ванг (2017) и др. были проведены опыты по нагнетанию расширяющегося полимера через инъекторы в грунт с характеристиками, приведенными в таблице по данным Фуминг Ванг(2017).

Name of soil layer	$\omega$	$\gamma_d$	$G_s$	$S_r$	$e$	$I_p$	$I_L$	$\Phi q$	$Cq$	$k$
—	%	$\text{kN/m}^3$	—	%	—	%	—	°	$\text{kPa}$	$\text{cm/s}$
Silt loam	26.2	15.2	2.71	95	0.747	13.0	0.44	14	28	$1.49 \times 10^{-5}$

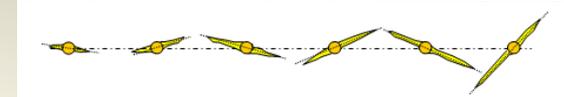
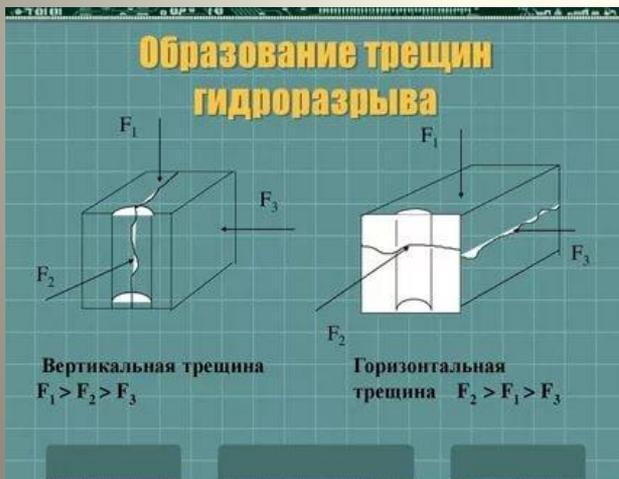


Схема инъекторов



Вид вертикальных гидроразрывов

Таким образом, при отсутствии нагрузки на поверхность грунта, т.е. только при наличии гравитационной нагрузки в грунте могут формироваться преимущественно вертикальные плоскости гидроразрывов между инъекторами. На формирование гидроразрывов и их ориентацию в пространстве влияет напряженное состояние грунта, его однородность, анизотропия, наличие дефектов –заколов, трещин, служащих концентраторами напряжений. В изученной имеющейся литературе по формированию гидроразрыва отсутствуют данные по влиянию нагрузки на поверхность грунта на ориентацию трещин гидроразрыва. Большой объем исследований имеется по формированию гидроразрывов при добыче нефти и газа. Однако можно отметить их общность в смысле формирования условий ориентации гидроразрыва. Так, формирование ориентации (вертикальной или горизонтальной) гидроразрыва, в основном, в горном деле трактуется из принципа распределения напряжений в горном массиве, что может быть пояснено с помощью рисунка ниже:



В рамках выполнения работ по опытному нагнетанию расширяющегося полимера URETEK были получены горизонтальные трещины гидроразрыва в бочках-емкостях (по сути в большеразмерных одометрах в условиях одномерного сжатия при наличии давления под штампом - 0,5-0,8 МПа на поверхности грунта в бочке). При этом большее значение давления соответствовало расширению полимера в грунте.



# 17. Обоснование формирования горизонтального гидроразрыва:

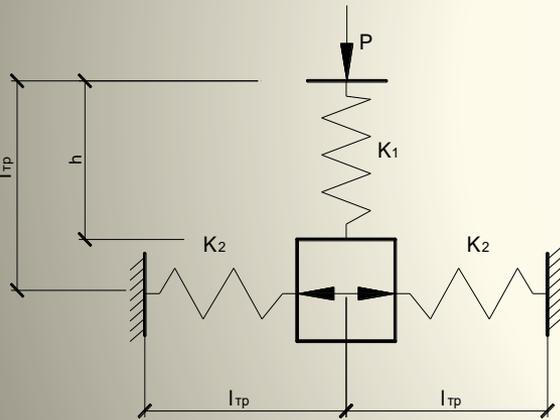
3. Существует экспериментальный материал Сергеева С.В. (2008), свидетельствующий о возможности образования горизонтальной трещины гидроразрыва (фото справа).

Для предварительной упрощенной оценки ориентации гидроразрыва (вертикальная или горизонтальная) предлагается следующая методика.

Движение жидкости, формирующей гидроразрыв, происходит в рамках упругой модели с тремя ортогональными пружинами, имеющими одинаковые жесткости, как показано на схеме. При этом, жесткости пружин принимаются пропорциональными сопротивлению грунта развитию трещин. В первом приближении сопротивление грунта развитию трещин можно оценить, например, на основе имеющейся методики «Marchi M., and others, (2013)» определения давления трещинообразования  $p_f$  (т/м, т.е. давление на единицу ширины трещины), согласно которому наиболее простым и рекомендованным способом является эмпирический по формуле:  $p_f = 1,33 \sigma_0 + 7,5$ , где  $\sigma_0$  - наименьшее из главных напряжений в рассматриваемой точке.



Далее предполагается, что давление расширения полимера в любом случае превышает давление гидроразрыва. Наличие или отсутствие нагрузки на поверхность грунта в рассматриваемой модели модифицируется отсутствием или наличием силы  $P$ , прикладываемой к концу А вертикальной пружины  $K_1$ . Конец А пружины  $K_1$  не закреплен. При наличии нагрузки на поверхность грунта и, соответственно силы  $P$ , вертикальное давление полимера будет уравниваться и пружина  $K_1$  будет удерживаться от перемещения ее верхнего конца, что соответствует в натуре отсутствию гидроразрыва в вертикальном направлении. Таким образом, давление гидроразрыва будет передаваться в горизонтальном направлении и будет сжимать горизонтальную пружину, что в предлагаемой модели соответствует горизонтальному гидроразрыву. Жесткость пружин принимается в первом приближении одинаковой:  $K_1 = K_2$ , т/м. При этом жесткость пружин предлагается принимать численно равным давлению гидроразрыва, отнесенным к единице ширины трещины. по формуле:  $K_1 = K_2 = p_f$



Далее предполагается, что давление расширения полимера или давление цементного раствора в любом случае превышает давление гидроразрыва. Наличие или отсутствие нагрузки на поверхность грунта определяется отсутствием или наличием силы  $P$ , прикладываемой к вертикальной пружине  $K_1$ . При наличии нагрузки на поверхность грунта и, соответственно силы  $P$ , вертикальное давление расширяющегося раствора будет уравниваться этой силой и пружина  $K_1$  будет полностью сжата и перемещение ее верхнего конца вверх (формирование вертикальной трещины), будет возможно только при отсутствии поверхностной нагрузки или при ее наличии при выполнении условия:

$P < K_2 * l_{тр}$  Если это условие не выполняется, то верхний конец пружины  $K_1$  будет удерживаться от перемещения, что соответствует в натуре отсутствию гидроразрыва в вертикальном направлении. Таким образом, при  $P \geq K_2 * l_{тр}$  давление гидроразрыва будет передаваться только в горизонтальном направлении и будет сжимать пружину  $K_2$ , что в предлагаемой модели и соответствует горизонтальному гидроразрыву.

# 17. Обоснование формирования гидроразрыва (примеры расчета)

1. г. Тула, Ленинский пр.63, 2015 г.

Закачка раствора в вертикальные иньекторы без нагрузки на поверхности грунта. Прогнозируемая ориентация трещин-вертикальная.

$$\sigma_0 = 2 * 5 * 0,4 = 4 \text{ т/м}^2, l_{\text{тр}} = 0,5 \text{ м.}$$

$$p_f = 1/33 * 4 + 7,5 = 12,82 \text{ т/м};$$

$$K_1 = K_2 = p_f = 12.82 \text{ т/м.}$$

Поскольку давление на поверхность грунта отсутствует, т.е. равно нулю, и произведение  $K_2 * l_{\text{тр}}$  по условию  $P < K_2 * l_{\text{тр}}$  заведомо больше нуля, при всестороннем давлении в камере сжатия пружина  $K_1$  начнет перемещаться в вертикальном направлении, т.е. в направлении наименьшей жесткости, и трещина начнет развиваться в этом направлении. В натуре при проведении опытной закачки и при отсутствии вертикальной нагрузки на поверхности грунта в массиве наблюдалось вертикальное формирование трещин гидроразрыва, что и соответствует прогнозируемой вертикальной ориентации трещины.

2. г. Москва, Экспериментальный корпус НИИОСП, 2017-2018 гг.

В бочку диаметром 1.1 м с песком и с поверхностной нагрузкой 0,5 МПа закачивался саморасширяющийся полимер.  $E = 33,5 \text{ МПа}$ ,

$l_{\text{тр}} = 0,55 \text{ м}$ . Фактическая ориентация трещин гидроразрыва- горизонтальная.

$$\sigma_0 = 50 * 0,4 = 20 \text{ т/м}^2. \quad p_f = 1/33 * 20 + 7,5 = 34,1 \text{ т/м}^2.$$

$$K_1 = K_2 = 34,1 \text{ т/м}$$

По условию  $P \geq K_2 * l_{\text{тр}}$ :  $K_2 * l_{\text{тр}} = 34,1 * 0,55 = 20,75 \text{ т}$ , что соответствует среднему давлению под штампом площадью  $0,5 \text{ м}^2$   $41,5 \text{ т/м}^2 < 50 \text{ т/м}^2$ , следовательно условие выполняется и прогнозная ориентация трещин – горизонтальная, что соответствует результатам экспериментальных исследований.



# 18. Расчетное моделирование технологии. Предпосылки и порядок расчета

Моделирование напряженно-деформированного состояния системы «основание – штамп» и его изменений в процессе нагнетания геопалимерных смол в массив грунта, заключенный в бочку, осуществлено с использованием программы PLAXIS.

При моделировании работы грунтового массива использовалась модель упрочняющегося грунта «Hardening soil».

Моделирование напряженно-деформируемого состояния грунтового массива в бочке по выбранным расчетным сечениям проводилось в соответствии с процессом его формирования.

При проведении расчетов учитывались только статические воздействия (ударные, динамические, вибрационные и другие технологические нагрузки и воздействия, связанные с производством работ, не учитывались).

Расчеты осуществлялись для Бочек №1 и 2 в несколько этапов:

1. Нагружение расчетной схемы штампом с нагрузкой 23 тс;
2. Увеличение нагрузки в системе до 26 тс;
3. Моделирование первого этапа инъектирования геопалимерных смол на глубину 60 см (для Бочки №1 – толщиной 4,5 см; для Бочки №2 – 6 см) с одновременным увеличением нагрузки до 46 тс;
4. Моделирование второго этапа инъектирования геопалимерных смол на глубину 100 см (для Бочки №1 – толщиной 12 см; для Бочки №2 – 10 см) с условием образования на глубине 60 см горизонтального гидроразрыва и одновременным увеличением нагрузки до 69 тс.

Характеристики грунтов принимались следующими: Песок –  $E = 33,5$  МПа;  $c = 0,1$  кПа;  $\phi = 24^\circ$ ;

**Затвердевшая геопалимерная смола -  $E = 45$  МПа;  $c = 2000$  кПа;  $\phi = 50^\circ$ .**

Инъектирование геопалимерных смол моделировалось с помощью команды «Prescribed displacement». Заданное перемещение прикладывалось по вертикальной оси  $y$  в обоих направлениях.

**При моделировании и расчете испытываемых Бочек № 1 и 2 в программном комплексе PLAXIS использовались следующие предпосылки:**

- Т.к. систему балок при испытаниях можно охарактеризовать как упругую, то штамп моделируется с помощью упругих тел с заданной жесткостью, защемленных между двумя пластинами, на одну из которых передавалась нагрузка, а другая опиралась на грунт.
- В связи с сокращением объема пор грунта во время закачивания геопалимерного состава, величина заданного перемещения «Prescribed displacement», при этом, уменьшается пропорционально уменьшению объема пор в массиве грунта между полимерным телом и нижней плоскостью фундамента.
- На основании наблюдений, отмеченных в Разделе 10 данной Презентации, величина заданного перемещения уменьшалась на 50% в связи со смешиванием материала с грунтом при инъектировании. Т.к. «чистый» материал составляет лишь половину толщины гидроразрыва, то его объем уменьшается на 50 %.
- В замкнутой системе (ограниченной по боковым граням) на этапе второго (на некоторой глубине  $h_3$ ) нагнетания геопалимерных смол, прикладывается дополнительная нагрузка на систему, характеризующая прочность сдвигу образованного под фундаментом затвердевшего тела, которое препятствует распространению деформаций от закачивания геопалимерного состава на большую глубину.



# 18. Расчетное моделирование технологии. Результаты расчета

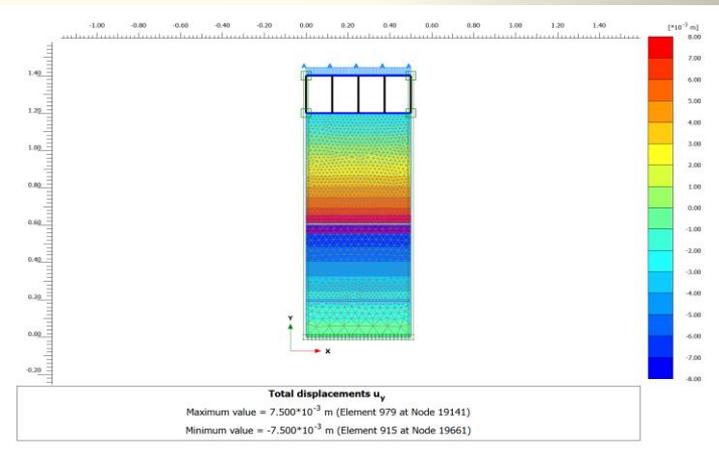
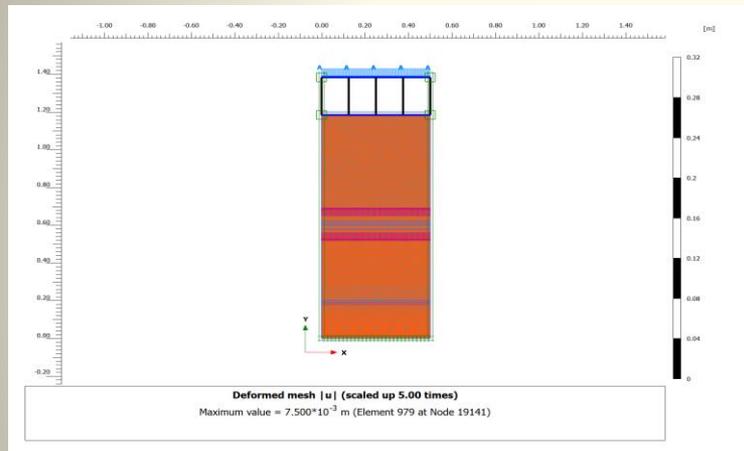
## Результаты расчета Бочки №1:

Поднятие штампа при первом этапе нагнетания геополимерных смол (на глубине 60 см) составило 3,1 мм (при натуральных испытаниях было: 1,1 мм)  
Поднятие штампа при втором этапе нагнетания геополимерных смол (на глубине 100 см) составило 8,9 мм, в то время как при натуральных испытаниях оно равнялось 5,9 мм.

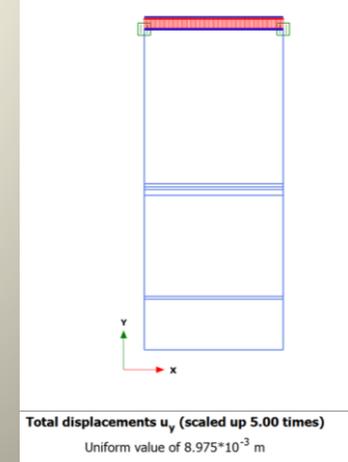
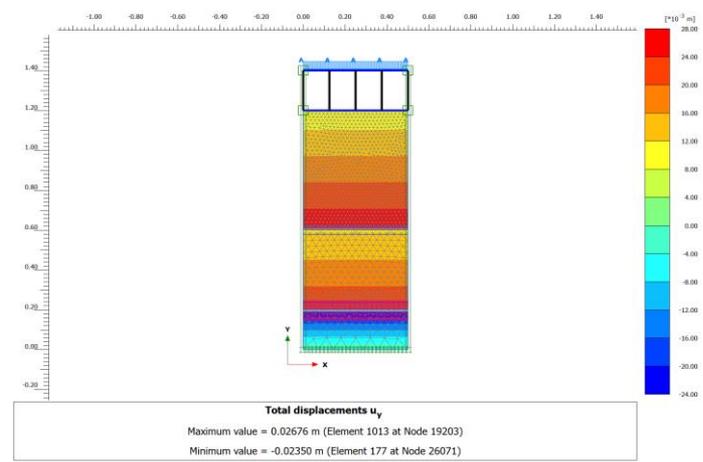
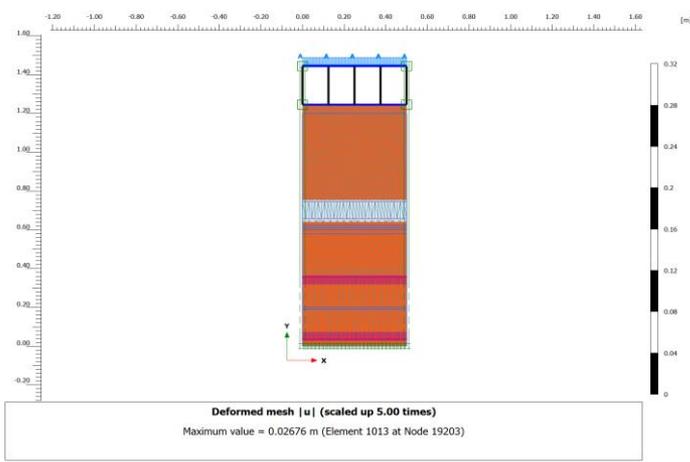
## Результаты расчета Бочки №2:

Поднятие штампа при первом этапе нагнетания геополимерных смол (на глубине 60 см) составило 1,65 мм (при натуральных испытаниях было: 2,8 мм)  
Поднятие штампа при втором этапе нагнетания геополимерных смол (на глубине 100 см) составило 8,7 мм, в то время как при натуральных испытаниях оно равнялось 5,3 мм.

### Этап первого нагнетания геополимера для Бочки №1



### Этап второго нагнетания геополимера для Бочки №1



**Спасибо за внимание!**



**НИИОСП**  
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА



**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр