

Применение кодов для динамической адаптации модельной сетки при решении задач водопонижения в среде DHI Feflow

Расторгуев И. А.¹, кандидат физ-мат. наук,
старший научный сотрудник (НИЦ Курчатовский ин-т),
Луканов Д. Д.², ведущий инженер (АО “Институт Гидропроект”)

Приводится подход, позволяющий уточнить сетку геофильтрационной модели, разработанной в программном комплексе Feflow. После изменения проектных решений с помощью скриптов на языке Python производится уточнение сетки модели. Этот подход позволяет значительно ускорить работу с моделью без полного ее пересбора.

Ключевые слова: геофильтрация, водопонижение, математическое моделирование, Feflow, скважина, конечно-элементная сетка, Python.

Application of codes for dynamic adaptation of a grid model in solving problems of drawdown in the DHI Feflow software

Rastorguev I. A.¹, PhD, senior researcher (NRC Kurchatov Institute),
Lukanov D. D.², lead engineer (JSC “Institute Hydroproject”)

This article represents a workflow to refine the grid of the groundwater flow model developed in the Feflow software package. After changing the design decisions with the assistance of scripts in the Python, the model mesh is reconstructed. This approach allows to speed up significantly the work with the model without completely rebuilding it.

Keywords: groundwater flow, drawdown, mathematical simulation, Feflow, well, finite element mesh, Python.

Для обоснования решений по разработке котлованов гидротехнических сооружений (ГЭС, МГЭС, АЭС) помимо аналитических методов может также применяться и численное моделирование фильтрации подземных вод на участке строительства. В настоящий момент набирает популярность программный комплекс DHI FEFLOW (7.0 – 7.5) [1], основанный на конечно-элементной дискретизации. Основным преимуществом данного программного комплекса является возможность гибкого учета фильтрационной неоднородности массива, сложной конфигурации фильтрационного потока, возможность задать контур котлованов сооружений, конструкцию противофильтрационной защиты (ПФЗ) и мониторинговой сети скважин для калибровки моделей, а также тепло- и массоперенос и др.

Для работы с конечно-элементными сетками в программный комплекс заложены настройки адаптации и улучшения качества сетки в соответствии с тремя возможностями (рис. 1). Все эти методы позволяют справиться с проблемами, возникающими при генерации некачественной сетки, либо в результате изменения сетки в процессе работы. Важно, чтобы была возможность избавиться от элементов с малой площадью и низким соотношением минимальной и максимальной длины ребра. Кроме

указанных способов присутствует функция локального измельчения сетки.

Дополнительно при генерации сетки есть возможность выбрать режим, удовлетворяющий критерию Делоне. Суть критерия следующая. Если внутри окружности, описанной вокруг любого треугольника треугольной сетки, не попадают никакие другие узлы, то такая сетка удовлетворяет крите-

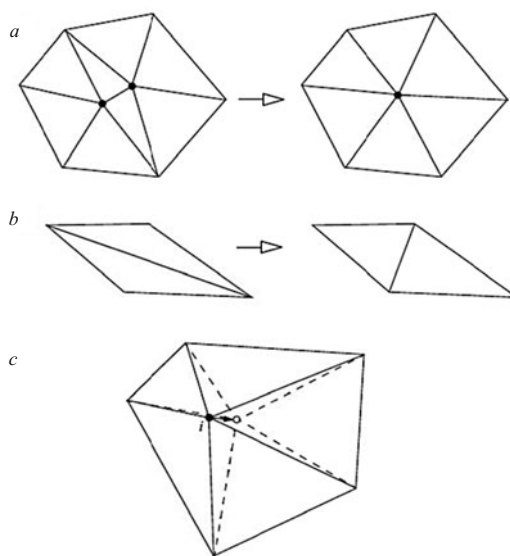


Рис. 1. Методы улучшения качества сетки: *a* — соединение близких (слипшихся) узлов; *b* — переброс диагонали для элементов, напоминающих форму “щепки”, сдвиг узла

¹ stiar@mail.ru

² dmitrii_lukanov@mail.ru

рию Делоне (или есть триангуляция Делоне) (рис. 2).

Критерий Делоне также может применяться и к самим сеточным треугольникам: треугольник удовлетворяет критерию Делоне, если ему удовлетворяет сетка, составленная из самого треугольника и соседних с ним треугольников. Одним из свойств критерия Делоне является то, что триангуляция Делоне обладает наибольшей суммой минимальных углов всех своих треугольников, а также наименьшей суммой радиусов описанных вокруг треугольников окружностей среди всех возможных сеток на той же системе узлов [2].

При большой размерности задачи адаптация и улучшение качества сетки могут быть выполнены в автоматическом режиме, с помощью скриптов Python. Применение этих скриптов показано далее на примере задачи с водопонижением в котловане, когда изменения сетки возникают из-за изменения конструкторских решений для уже разработанной геофильтрационной модели, выполняющей расчёты. В таком случае необходима новая конфигурация сетки, учитывающая изменения в компоновке строительных котлованов, что влечет за собой пересборку модели (задание модельных слоёв, коэффициентов фильтрации, граничных условий и др.). Далее показан результат работы алгоритма, позволяющего учесть новую компоновку сооружений без необходимости в сборке геофильтрационной модели с нуля.

Описание решаемой задачи. Для обоснования проектных решений по разработке котлованов гидротехнических сооружений одного строящегося

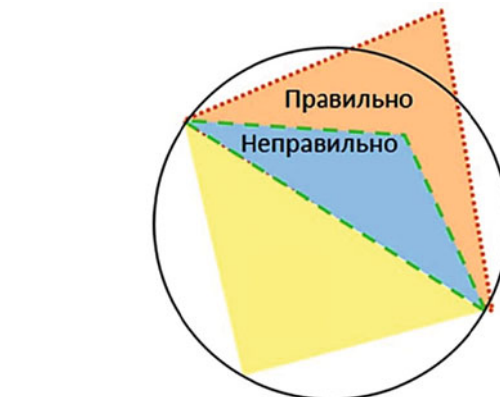


Рис. 2. Сетка, удовлетворяющая критерию Делоне (красный треугольник) и не удовлетворяющая ему (синий треугольник)

ротехнических сооружений одного строящегося объекта была подготовлена геофильтрационная модель. Основная задача, которая ставилась перед этой моделью — выполнение моделирования геофильтрационных процессов и оценка приточности в котлованы, определение притоков воды в системы дренажных скважин и оценка возможности возникновения суффозионных процессов.

Котлованы гидротехнических сооружений имеют проектную глубину до 30 м и огорожены противофильтрационной защитой на всю глубину (рис. 3). Внутри котлованов по периметру в качестве мер по водопонижению предусмотрен ряд самоизливающихся скважин. Расчёты водопонижения делались при условии снижения уровня внутри котлована на 1 м ниже отметки дна котлована.

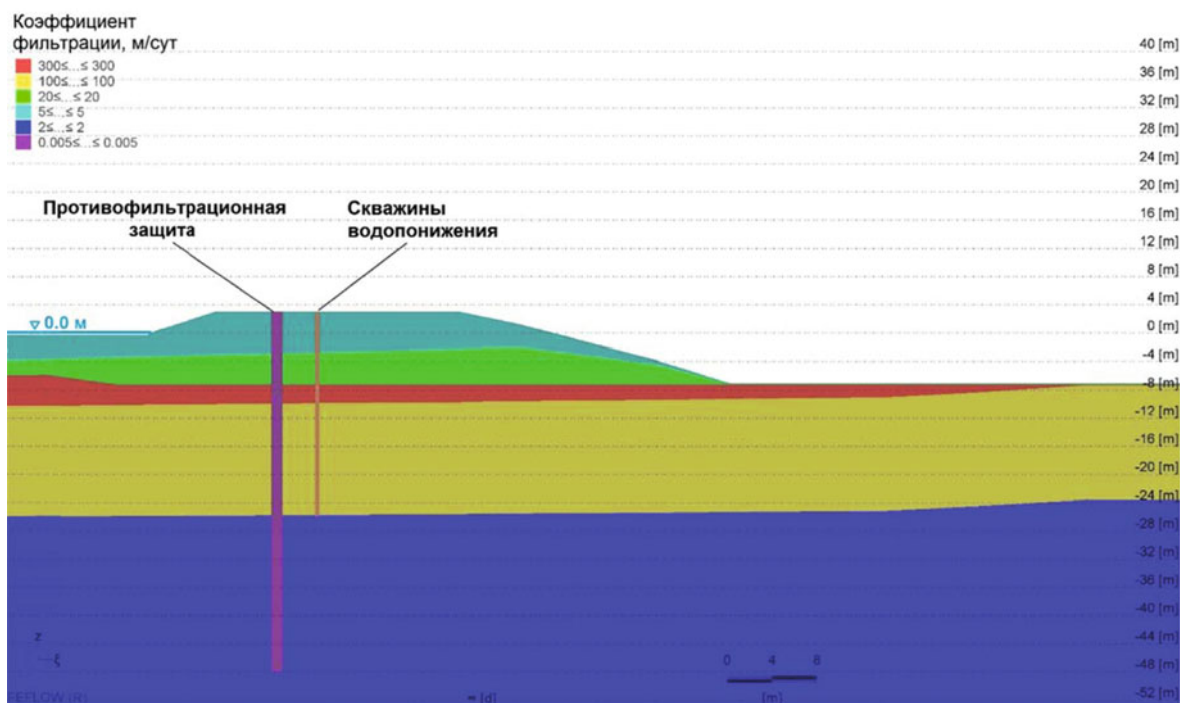


Рис. 3. Разрез через часть котлована

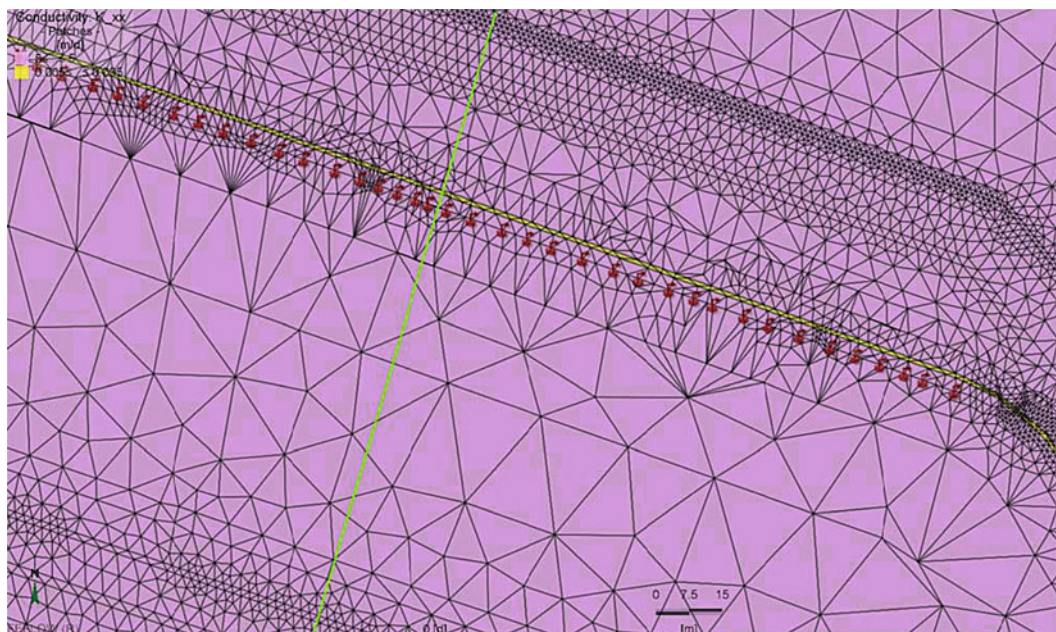


Рис. 4. План с линией разреза: жёлтой линией показана ПФЗ, зелёной — линия разреза, красными галочками — водопонижительные скважины

Гидрогеологические условия участка работ обусловлены наличием разновозрастных песчаных и разной степени сохранности карбонатных отложений. Мощность отдельных слоев может достигать нескольких десятков метров. На глубине более 100 м залегают слабопроницаемые отложения (относительный водоупор), принятые на модели в качестве нижней границы.

Высокие значения водопритоков в строительных котлованах обусловлены наличием региональ-

ного потока, направленного в сторону акватории, а также близостью участка работ к самой акватории.

Модель геофильтрации для территории объекта разработана в трехмерной стационарной постановке. Процесс сборки геофильтрационной модели для заранее известных проектных решений по готовым чертежам не представляет сложностей. Первоначальный этап — генерация сетки по проектным чертежам и границам модельной области. Следующий этап после разбивки сетки — добавление стратиграфических элементов, параметрических осо-

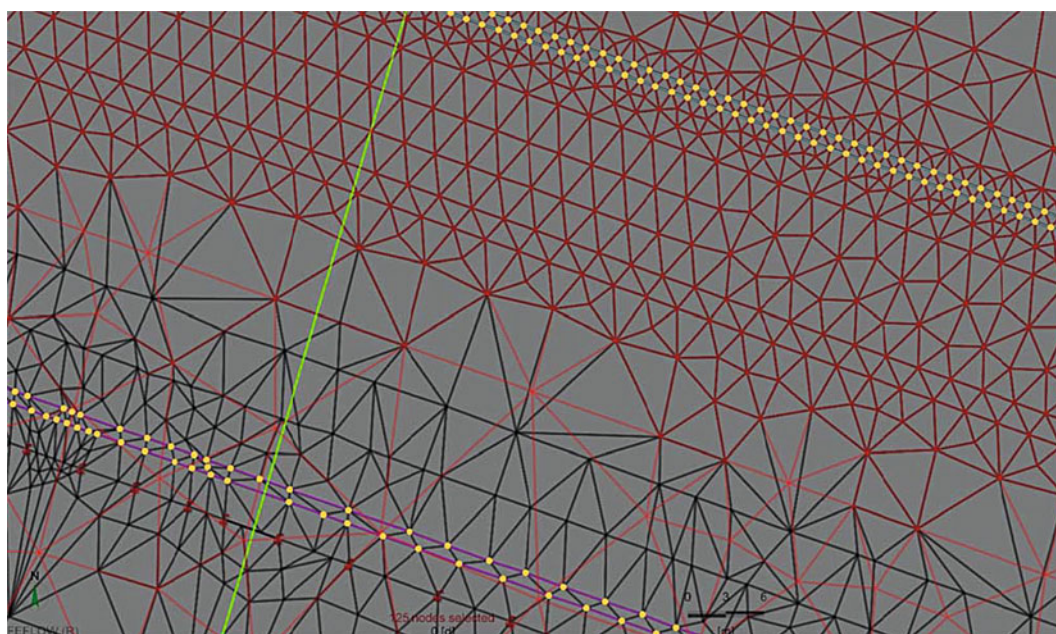


Рис. 5. Сравнение фрагмента перестроенной сетки и старого варианта: красным цветом показан старый вариант сетки, чёрным — новый; темно-красный цвет показывает, что элементы сетки совпадают; бирюзовым цветом показана ПФЗ в старом варианте, розовым — в новом; зеленой линией показана линия разреза; жёлтые точки — узлы старой и новой ПФЗ; красными галочками — скважины водопонижения

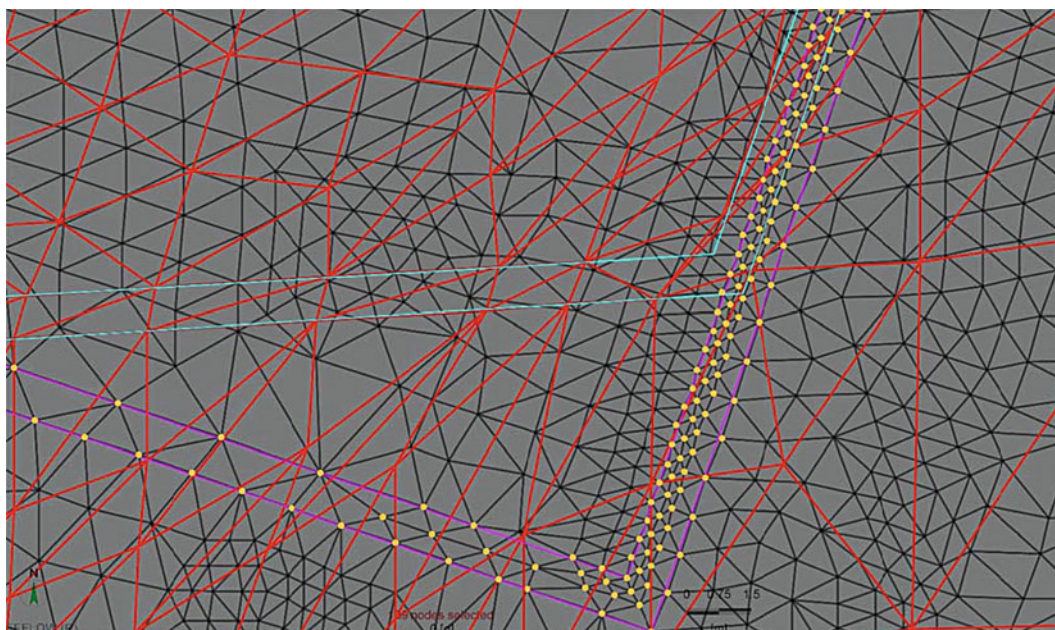


Рис. 6. Сравнение фрагмента перестроенной сетки и старого варианта: красным цветом показан старый вариант сетки, чёрным — новый; темно-красный цвет показывает, что элементы сетки совпадают; бирюзовым цветом показана ПФЗ в старом варианте, розовым — в новом; жёлтые точки — узлы новой ПФЗ

бенностей модели, граничных условий, отметок котлованов, положения ПФЗ и водопонижающих скважин (рис. 4). Последний этап занимает продолжительное время в связи с высокой детализацией модели.

При проектировании вообще и на данном объекте, в том числе, возникает необходимость частого пересмотра проектных решений в виде изменений контуров котлованов, положения ПФЗ и соответственно систем водопонижения по независимым от специалистов, занимающихся моделированием,

причинам. Внесение новых изменений по положению сооружений в программном комплексе Feflow требует занимающей много времени корректировки модели.

Решение, позволяющее ускорить уточнение конечно-элементной сетки без полного пересбора модели, реализовано следующим образом. Был использован программный функционал Feflow, реализованный с помощью интерпретатора Python v2.7 и доступный в Feflow, начиная с версии 7.1. Программный интерфейс обладает рядом API

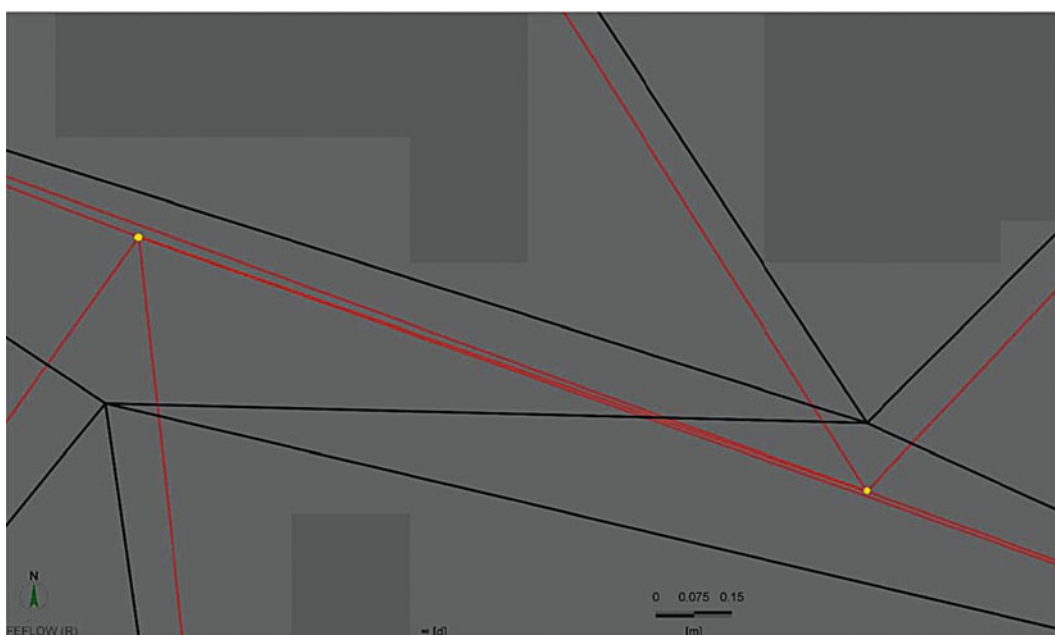


Рис. 7. Пример “слипания” узлов: жёлтым цветом показаны “слипающиеся” узлы, чёрным — сетка после исправления “слипания”

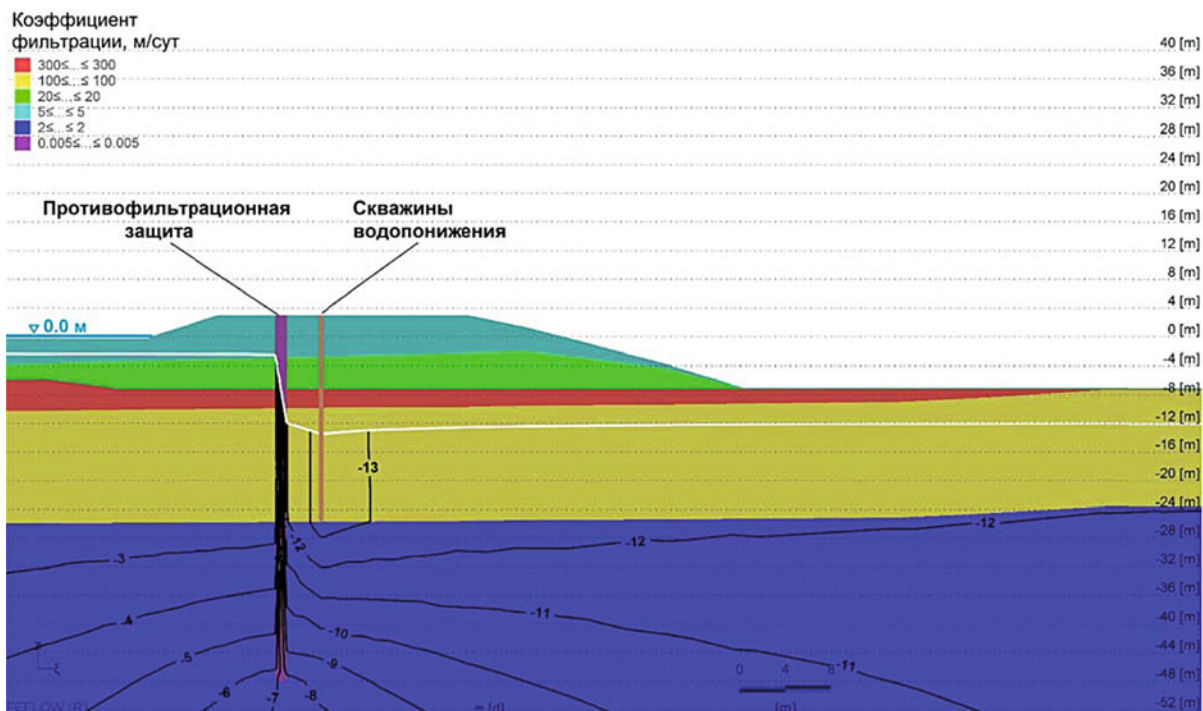


Рис. 8. Разрез через часть котлована: белым цветом показана депрессионная кривая, чёрным — гидроизогипсы

функций по добавлению и перемещению узлов сетки. Одна из таких функций `MoveNode()` позволяет выставить узлы сетки вдоль выбранной линии чертежа. Таким образом, за счёт фрагментарного перестроения сетки с помощью программного скрипта была реализована возможность быстрого уточнения сетки геофильтрационной модели и поддержка проектных решений. Примеры фрагментов перестроения сетки по изменившимся проектным решениям показаны на рис. 5 и 6.

Побочным эффектом перестроения сетки с помощью скрипта, негативно влияющим на качество расчёта, может быть ухудшение качества сетки — «слипание» узлов (рис. 7), когда вид треугольных элементов напоминает форму «щепки» (по-английски *slivers* [1]) и сетка не удовлетворяет критерию Делоне в этой части. Это влияет на качество расчёта. Объяснение такому эффекту следующее. Элементы из «щепок» имеют малую площадь. Численная схема в расчёте использует значение площади при решении уравнения фильтрации в знаменателе. Низкие значения в знаменателе приводят к большим числам и плохой сходимости баланса и численного решения.

Данная проблема также решается с помощью кода на Python, позволяющего автоматически находить такие элементы и устранять слипание.

Результаты. Реализация скрипта позволила оперативно менять сетку и просчитать более десятка версий проектных решений. Произвести гео-

фильтрационные расчёты, оценив приточность к скважинам водопонижения, показать форму депрессионной кривой в районе котлована и оценить суффозионную устойчивость (рис. 8).

Программный функционал Feflow, реализованный с помощью интерпретатора Python v2.7, позволяет решать многие задачи, которые упрощают работу специалиста и сокращают временные затраты на обработку материалов, задание модельных параметров, работу с сеткой модели и расчёт проектных решений. Применение встроенных интерпретаторов будет в дальнейшем развиваться и, как правило, улучшать качество моделей и их сеток.

По результатам расчётов были получены величины расходов к скважинам и определено положение депрессионной кривой (рис. 7) при новой компоновке котлованов. При этом, не происходило новой сборки модели, требующей значительных затрат сил и времени.

Такой подход может применяться к любой модели, требуется корректировка сетки в результате изменения проектных решений.

Список литературы

1. Diersch, H.-J. G. (2005). FEFLOW Software — Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System — Reference Manual. — WASY GmbH, Berlin.
2. Галанин М. П., Щеглов И. А. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы. — Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2006. 009. — 32 с.