



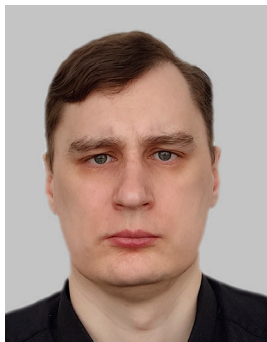
КРАТКИЙ ОБЗОР ПРОГРАММЫ WELL FORCE ZERS 3.0

Компьютерная программа Well Force ZERS 3.0 разработана в «НТЦ ЗЭРС» (свидетельство о регистрации №2024612271 от 30.01.2024г) и предназначена для выполнения расчётов нагрузок и давлений при операциях, связанных с заканчиванием скважин. В отличие от предыдущей версии Well Force 2.0 [1] программа Well Force ZERS 3.0 имеет новую логику работы с базами данных, которой не требуется Microsoft Access. Интерфейс программы позволяет полноценно работать со «Справочниками», содержащими параметры оснастки и труб, непосредственно в отдельной вкладке программы – с помощью встроенного редактора. Программа Well Force ZERS 3.0 позволяет также оперативно изменять настройки и обмениваться данными – как с помощью удалённого сервера, так и без него. Основными отличиями расчётного модуля программы Well Force ZERS 3.0 от предыдущей версии являются новая методика расчёта допускаемых нагрузок, реализованная в наиболее полной постановке, а также новая методика расчёта напряжённо-деформированного состояния сжимаемых труб, учитывающая в том числе их собственное искривление. Отмеченные обстоятельства дают преимущество Well Force ZERS 3.0 над конкурентами и рассматриваются в статье вместе с демонстрационными примерами. В настоящий момент разработка программы Well Force ZERS 3.0 завершена и её демонстрационная (нелицензионная) версия вместе со вспомогательными материалами размещена по адресу: <http://programs.werytag.ru/Programs>. Описание программы и презентация доступны пользователям после установки программы.

Ключевые слова: скважина, обсадная колонна, гидравлические потери, центратор, вес на крюке, допускаемый вес, эквивалентное напряжение, потеря устойчивости, коэффициент трения.



Пузанов Д.Н.
канд. физ.-мат. наук
ООО «НТЦ ЗЭРС»
начальник отдела
расчётов и
моделирования
pdn@zers.ru



Чекунов А.И.
ООО «НТЦ ЗЭРС»
ведущий инженер-
программист
cai@zers.ru

Общая информация по программе Well Force ZERS 3.0

Программа Well Force ZERS 3.0 разработана в «НТЦ ЗЭРС» [2] (Свидетельство о регистрации №2024612271 от 30.01.2024г), и предназначена для расчёта напряжений, продольных и контактных сил, крутящих и изгибающих моментов, действующих на трубы и оснастку, перемещаемых в скважине, с учётом наличия центраторов [3] и гидравлического сопротивления. Программа Well Force ZERS 3.0 позволяет выполнять расчёт деформаций, допускаемых нагрузок и допускаемых весов (в т.ч. в вероятностной постановке), а также определять расстановку центраторов и оптимизировать проектный профиль скважины. Расчёт нагрузок и гидравлических потерь возможен для нескольких растворов, одновременно

находящихся в скважине (включая прокачку в пласт), при этом используется уточнённая Бингамовская модель жидкости [4,5].

По своему назначению программа Well Force ZERS 3.0 похожа на программы [6,7] с акцентом на операции, связанные с заканчиванием скважин [8], однако, сильно отличается от этих программ как в интерфейсной, так и в расчётной части. Наиболее сильными сторонами программы Well Force ZERS 3.0, которые обеспечивают её преимущество над конкурентами, являются:

- «кустовой» (для набора коэффициентов трения) расчёт нагрузок;
- удобный интерфейс, позволяющий оперативно формировать и обмениваться исходными данными по скважинам и справочными данными по элементам оснастки и трубам;
- расчёт допускаемых весов и нагрузок (также «кустовой») в наиболее полной постановке [9];
- расчёт расстановки центраторов по разным алгоритмам (для разных целей);
- новая модель расчёта деформаций и напряжений в сжимаемых трубах [10], включающая учёт собственного искривления труб, величина которого по ГОСТам может достигать 0,2% от длины труб [11,12].

Программа Well Force ZERS 3.0 работает в операционной системе Windows и состоит из двух частей – расчётного модуля и интерфейсной части, с которой работает пользователь. Интерфейсная часть программы формирует наборы исходных данных в виде отдельных файлов для расчётного модуля, запускает требуемое количество раз расчётный модуль в фоновом режиме (может быть запущено одновременно несколько расчётов), обеспечивает визуализацию полученных результатов и формирует файлы в Word и Excel с отчётами по результатам выполненных расчётов. Работа с программой возможна как на локальном компьютере, так и в режиме сохранения/редактирования исходных данных на удалённом сервере, на который или с которого возможна передача исходных данных по скважинам, а также обмен справочниками и описанием исходных данных.

Демонстрационная (нелицензионная) версия программы вместе со вспомогательными материалами (описание программы и презентация) доступна всем и размещена по адресу: <http://programs.werymag.ru/Programs>. Проверку корректности работы программы рекомендуется выполнять на тестовом примере 90-degree/Full, при выполнении которого в папке с результатами появится папка с набором рисунков и пять отдельных файлов: основной «отчёт» с графиками и таблицами, объёмом 104 страницы, две «карты спуска» (одна – с допускаемыми

весами, другая – с возможностью масштабирования и смещения), файл с результатами гидравлического расчёта и файл с исходными данными по скважине. В демонстрационной версии программы установлены ограничения: расчётный шаг по длине $dl=3,0$ м и максимальное отклонение расчётного профиля скважины от данных инклинометрии $Def\ c\ max=0$ (т.е. обработка данных инклинометрии не выполняется). Это не позволяет выполнять стандартные расчёты с требуемой точностью и исследовать сходимости результатов, а также полноценно работать с данными инклинометрии, включая оптимизацию профиля скважины. Демонстрационная версия также не поддерживает режим работы с удалённым сервером (за исключением обновлений программы), что снижает удобство работы с программой.

Ниже кратко рассматриваются основные особенности программы Well Force ZERS 3.0 и её отличия от предыдущей версии Well Force 2.0, рассмотренной в работе [1]. Особое внимание уделяется расчёту допускаемых нагрузок [9] и расчёту деформаций и нагрузок в сжимаемых трубах [10].

Интерфейсная часть программы Well Force ZERS 3.0

Наиболее значимым отличием интерфейсной части программы Well Force ZERS 3.0 от предыдущей версии является новая структура и логика работы с базой данных по элементам оснастки и скважинам. Это позволило отказаться от работы с базой данных Microsoft Access, что значительно повысило удобство и надёжность программы. Программа Well Force ZERS 3.0 включает встроенный редактор для изменения «Справочника» по элементам оснастки, а также описания параметров (доступно в режиме администрирования). Вид открытой вкладки «Справочника» при его редактировании представлен на **рис. 1**.

В отличие от предыдущей версии интерфейса программы Well Force ZERS 3.0 является мультиязычным. По умолчанию доступным является русский и английский язык, однако пользователь может добавить любой другой язык, сделав перевод надписей и шаблонов самостоятельно и сохранив их в виде новых файлов.

Интерфейсная часть программы позволяет вставлять таблицы с коэффициентами каверности, пластовым давлением или диаметром скважины, а также загружать расстановку центраторов и выполнять с такой расстановкой все расчёты. Работа с основными настройками программы осуществляется в отдельной вкладке, при этом полный набор настроек содержится в текстовых файлах в специальной папке. На **рис. 2** показан вид вкладки управления основными настройками программы (слева) и вид меню вставки таблиц во вкладку «Обсаженный и открытый ствол» (справа).

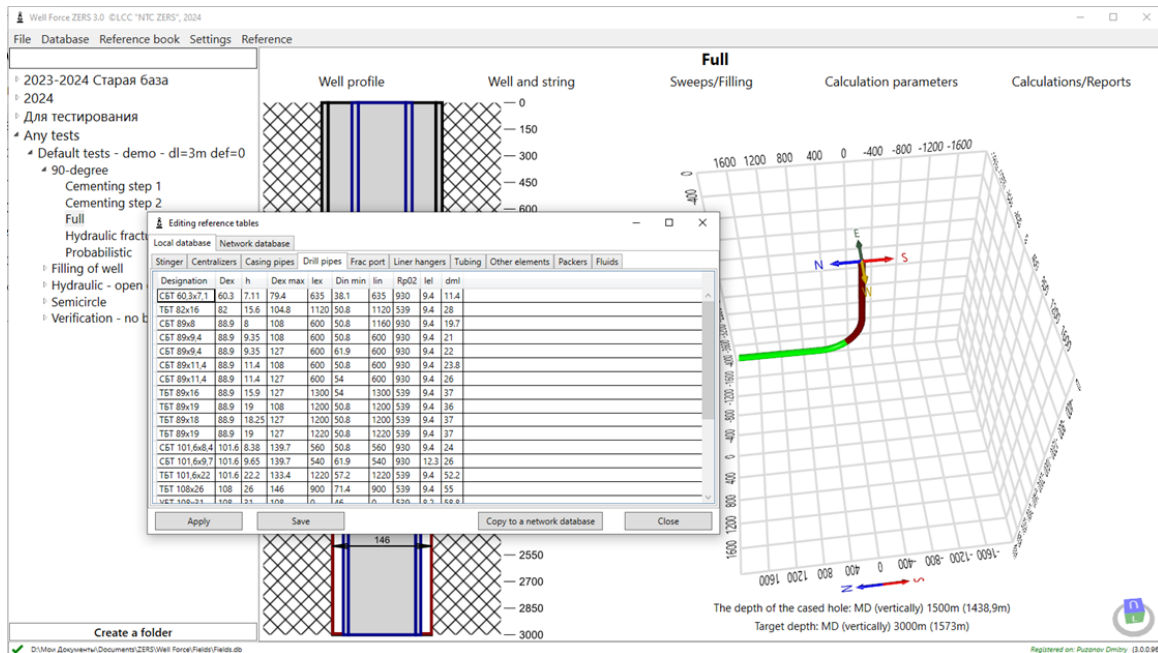


Рис.1. Вид окна редактирования «Справочника».

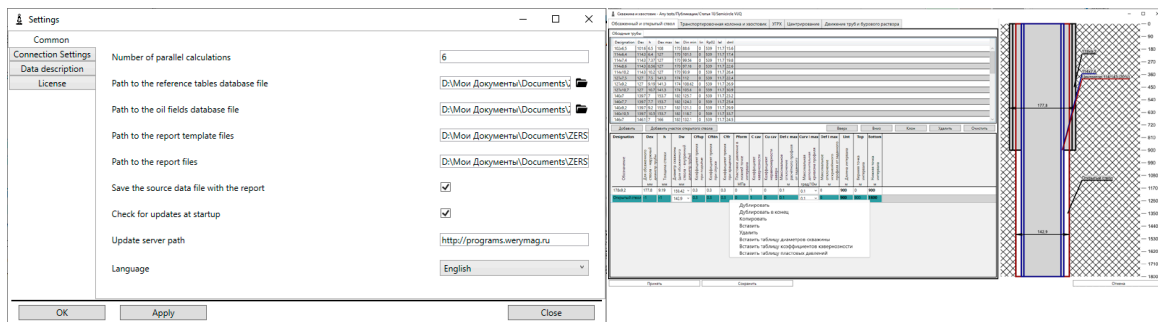


Рис.2. Вид вкладки «Настройки» (слева) и меню вставки таблиц (справа).

Программа Well Force ZERS 3.0 позволяет легко обмениваться/передать справочные данные и данные по скважинам. По умолчанию в программе включен режим автоматического формирования файла с исходными данными, который может быть считан программой на любом другом компьютере, т.е. фактически в программе Well Force ZERS 3.0 реализован удобный режим обмена данными без обращения к серверу.

Расчётная часть программы Well Force ZERS 3.0

Расчётный модуль программы Well Force ZERS 3.0 представляет собой отдельную программу с простым интерфейсом, который позволяет считывать исходные данные из текстовых файлов, сохранять результаты расчётов в текстовые файлы и строить на экране различные графики. Расчётная модель предполагает разбивку всей меры на отрезки малой длины, при этом шаг между соседними расчётными узлами *dl* должен быть в несколько раз меньше длины наименьшего элемента меры, оказывающего значимое влияние

на результаты расчёта. Значение *dl* также должно быть в несколько раз меньше минимальной длины полуволн искривления профиля скважины и собственного искривления труб. Если эти условия не выполняются, то точность результатов расчёта будет низкой. Значительные погрешности также возможны в том случае, когда расчётный шаг *dl* на несколько порядков превосходит величину зазора между трубами и скважиной: *dl* >> *dr*.

Расчётный модуль также включает в себя специальную процедуру обработки исходных данных инклинометрии (профиль скважины), которые содержат случайные ошибки измерений [13]. Использование этой процедуры уменьшает влияние случайных ошибок измерений на результаты расчётов, однако, при этом расчётный профиль скважины в общем случае отличается от данных инклинометрии – на величину, определяемую параметром *Def c max*. При отсутствии обработки данных инклинометрии результаты расчётов в некоторых случаях (при больших ошибках изме-

рений и малых интервалах между измеренными точками) будут слишком консервативными. Демонстрационная версия программы Well Force ZERS 3.0 имеет ограничения: $dl=3,0$ м и $Def\ c\ max=0$, что не позволяет выполнять расчёты с высокой точностью (особенно это заметно при расчётах расстановки центраторов, которые программа устанавливает в расчётные узлы).

В ходе разработки программы Well Force ZERS 3.0 опубликовано 18 работ в научных журналах. Тестирование расчётного модуля представлено в работах [5] (гидравлическая часть) и [14] (механическая часть). Наиболее сильными сторонами расчётного модуля является расчёт допускаемых нагрузок [9] и расчёт напряжений и деформаций в сжимаемых трубах [10]. Рассмотрим их подробнее.

Расчёт допускаемых нагрузок. Для расчёта интенсивности напряжений в рассматриваемой точке используется энергетическая теория прочности [15,16] и концепция «равноопасных нагрузок», которая применяется не только к трубам, но и к оснастке. При расчёте какой-либо допускаемой нагрузки (допускаемая растягивающая или сжимающая сила, допускаемый крутящий или изгибающий момент) в рассматриваемой точке учитываются одновременное действие всех нагрузок: все нагрузки, кроме рассчитываемой, фиксируются на уровне расчётных значений в этой точке. Интерфейс программы Well Force ZERS 3.0 предполагает, что пользователь задаёт для каждого из элементов меры допускаемую сжимающую и растягивающую силу и допускаемый крутящий и изгибающий момент в предположении об отсутствии действия других нагрузок (включая искривление труб при сжатии), но с учётом коэффициента запаса по прочности (КЗП). Для труб эти значения рассчитываются программой автоматически по формулам сопромата [17] при заданном КЗП, при этом пользователь может также задать свои значения. Учитывается, что в некоторых случаях какая-либо допускаемая нагрузка может не зависеть от действия других нагрузок – в этом случае она задаётся со знаком «минус».

Для расчёта i -ой допускаемой нагрузки через напряжения в рассматриваемой точке в программе Well Force ZERS 3.0 используется следующее выражение (общий вид):

$$[\sigma, \tau]^i = \sqrt{\frac{\left((\sigma_{l0}^i \pm \sigma_{lb}^i - \sigma_t^i)^2 + (\sigma_{r0}^i \pm \sigma_{rb}^i - \sigma_r^i)^2 + (\sigma_i^i - \sigma_r^i)^2 \right)}{2} + 3 \cdot (\tau_{rr}^{i2} + \tau_{rs}^{i2})} \quad (1)$$

$$(\sigma, \tau)_k^i = [\sigma, \tau]^i \cdot C_k^i \cdot \frac{F_k}{F_k^{max}}; \quad C_k^i = \left\{ 1; \frac{1}{\sqrt{3}}; \sqrt{3} \right\}$$

Где: $[\sigma, \tau]^i$ – максимальное допускаемое напряжение (нормальное или касательное) в элементе для i -ой нагрузки с учётом КЗП при отсутствии других нагрузок;

$(\sigma, \tau)_k^i$ – напряжение в элементе для i -ой нагрузки, равноопасное воздействию на него k -ой нагрузки F_k ;

F_k^{max} – максимально допускаемое значение для k -ой нагрузки F_k без учёта действия остальных нагрузок.

В выражении (1) σ и τ – нормальные и касательные напряжения соответственно; индексы означают: « l, t, r » – продольные, окружные и радиальные напряжения; « $0, b$ » – мембранные и изгибные напряжения; « rr, rs » – касательные напряжения при кручении и срезе; i – рассчитываемая нагрузка: продольная ($i=l0$), изгибающая ($i=lb$) или крутящий момент ($i=rr$). Максимальное допускаемое напряжение в элементе для i -ой нагрузки, определяется по наружному и внутреннему диаметру основного тела трубы или оснастки с использованием формул сопромата [17]. Например, допускаемое напряжение при растяжении или сжатии рассматриваемого элемента $[\sigma]^{l0}$ определяется через заданную пользователем максимальную допускаемую нагрузку при растяжении или сжатии P^{l0max} и площадь поперечного сечения элемента Seq : $[\sigma]^{l0} = P^{l0max} / Seq$.

Рассмотрим конкретный пример использования выражения (1): предположим, что нам нужно найти допускаемый изгибающий момент. Сначала по внутреннему и наружному диаметру основного тела трубы или элемента оснастки по формулам сопромата находится момент сопротивления изгибу Weg и допускаемое напряжение при чистом изгибе этого элемента $[\sigma]^{lb} = Mb^{max} / Weg$ (Mb^{max} – заданный пользователем максимальный допускаемый момент при чистом изгибе рассматриваемого элемента). Затем определяются эквивалентные значения всех остальных компонентов выражения (1) (кроме искомого σ_{lb}^{lb}) с использованием концепции «равноопасных нагрузок» – см. выше. Например, если рассматриваемый элемент меры выдерживает продольную нагрузку $F_{l0}^{max} = 100$ тс, и в рассматриваемом сечении действует расчётная продольная нагрузка $F_{l0} = 40$ тс, то в выражении (1) должно быть подставлено $\sigma_{l0}^{lb} = 0,4 \cdot [\sigma]^{lb}$. Далее из выражения (1) находится искомое значение σ_{lb}^{lb}

по которому по формулам сопромата определяется допускаемый изгибающий момент. Аналогичным образом можно найти допускаемую растягивающую или сжимающую продольную силу и допускаемый крутящий момент.

Несмотря на краткость выражения (1), при его практической реализации в компьютерной программе возникает большое количество логических условий по следующим причинам:

- квадратное уравнение (1) имеет два корня;
- изгибные напряжения элемента меры в рассматриваемом сечении разных знаков;
- допускаемая растягивающая и сжимающая сила на элемент могут быть разными;
- при сжатии элемента следует учитывать появление дополнительных изгибных напряжений, связанных с его дополнительным искривлением [10];
- рассматриваемая допускаемая нагрузка на элемент может не зависеть от действия других нагрузок (встречается в оснастке);

- следует разделять продольную силу, вызывающую искривление труб, и полную продольную силу, представляющую собой интеграл продольных напряжений в рассматриваемом сечении: они отличаются на величину гидростатического давления, которое может быть разным в трубном и затрубном пространстве;

- следует учитывать, что рассматриваемый элемент меры может иметь собственное искривление, что изменит его напряжённо-деформированное состояние (НДС), особенно при сжатии [10];

- следует учитывать, что используемая в программе Well Force ZERS 3.0 энергетическая теория прочности [15,16] предполагает, что нормальное и касательное напряжение являются равноопасными, если они отличаются в 1,7 раза (при использовании теории наибольших касательных напряжений – в 2 раза [17]);

- окружные напряжения могут давать существенный вклад в результаты (при большом перепаде давлений в трубном и затрубном пространстве), однако, допускаемые значения для них не задаются пользователем; похожая ситуация с допускаемыми радиальными напряжениями и напряжениями среза, однако обычно они малы, поэтому не оказывают значимого влияния на результат.

Значительное количество учитываемых факторов приводит к сложной логической схеме программной реализации выражения (1). Тем не менее, эта задача была решена, и рассматриваемая концепция была реализована в программе Well Force ZERS 3.0. Примеры расчётов допускаемых нагрузок с комментариями представлены в работе [9].

Расчёт напряжений и деформаций в сжимаемых трубах. Традиционные подходы оцен-

ки НДС сжимаемых труб предполагают расчёт деформаций, контактных сил и допускаемой сжимающей нагрузки по относительно простым формулам [18-20]. Считается, что если сжимаемая труба теряет устойчивость и за счёт этого искривляется (сначала синусоидально, затем спирально), то это является опасным и недопустимым. В результате обосновать или оценить запас по прочности насосно-компрессорных труб (НКТ) при гидравлическом разрыве пласта (ГРП) становится невозможным, т.к. в подавляющем большинстве случаев сжимающие нагрузки на НКТ от давления ГРП кратно превышают критические нагрузки, при которых возникает не только синусоидальный, но и спиральный изгиб. Более того, при ГРП часто используют предварительную разгрузку на нижний торец колонны НКТ, типичная величина которой для скважин малого диаметра составляет 15 тс. И даже такая продольная сила в большинстве случаев приводит к превышению критической сжимающей нагрузки, при которой формируется синусоидальный и спиральный изгиб. Получается, что по расчёту даже разгрузку на НКТ делать нельзя, однако, её всегда делают, игнорируя эту «опасность», и ничего страшного не происходит. В реальности пластические деформации НКТ (остаточный спиральный изгиб труб) происходят лишь в редких случаях – именно при ГРП с большим давлением, когда продольные сжимающие силы в НКТ достигают нескольких десятков тонн при одновременном воздействии избыточного внутреннего давления, вызывающего значительные растягивающие окружные напряжения в НКТ.

Пример с оценкой прочности НКТ, нагружаемых продольными сжимающими силами, наиболее показателен, т.к. НКТ обычно значительно уступают по прочности буровым трубам. Можно отметить, что при большой длине участка сжимаемых труб и малых контактных силах между трубами и скважиной (например, прямые трубы находятся в прямом вертикальном стволе), колонна труб будет терять устойчивость и искривляться даже при незначительных сжимающих силах: сначала по синусоиде, затем по спирали. Но это не будет приводить к появлению значительных напряжений в трубах или больших контактных сил между трубами и скважиной - из-за малой интенсивности искривлений, т.к. шаг синусоидального или спирального изгиба будет большим, а его амплитуда малой из-за малого зазора между сжимаемыми трубами и скважиной. С другой стороны, при большом избыточном внутреннем давлении прочность труб при сжатии может исчерпываться раньше, чем будет формироваться синусоидальный или спиральный изгиб. Получается, что традицион-

ный подход, предполагающий ограничение на продольную сжимающую нагрузку в виде критической сжимающей нагрузки, при которой происходит формирование синусоидального или спирального изгиба является малоинформативным и не практичным.

Для более адекватной оценки допускаемой сжимающей нагрузки была разработана новая, более подробная модель, учитывающая в т.ч. и собственное искривление труб, которое может значительно увеличивать контактные силы между сжимаемыми трубами и скважиной [10]. Вместо оценки критической силы, при которой возникает синусоидальный или спиральный изгиб сжимаемых труб, предложенная модель предполагает расчёт максимальных эквивалентных напряжений в сжимаемых трубах с учётом их начального и дополнительного искривления при сжатии (в программе Well Force ZERS 3.0 есть возможность строить графики допускаемых нагрузок и весов по критерию «синусоидальный или спиральный изгиб»). Такой подход, хоть и значительно сложнее, но позволяет снизить консерватизм и получать более точные оценки запасов по прочности сжимаемых труб. Новая модель позволяет прогнозировать заклинивание труб не только за счёт их пластического деформирования при сжатии с учётом изгиба, но также и за счёт неограниченного роста контактных сил между сжимаемыми трубами и скважиной, хотя такой сценарий возможен лишь при сжатии гибких труб малого диаметра (по сравнению со скважиной) при больших коэффициентах трения.

Предложенная модель [10] была верифицирована на специальных экспериментах по сжатию нержавеющей трубок внутри акриловой трубы большего диаметра [18], а также путём сравнения с результатами расчётов, выполненных методом конечных элементов (МКЭ) [21,22]; результаты этой верификации представлены в работе [23]. На основе этой модели реализована вероятностная методика обоснования проектов скважин, предполагающая случайных характер собственного искривления всех элементов меры в пределах допускаемых величин, регламентируемых нормативными документами [11,12]. Фактически, модель, представленная в работе [10], позволяет отказаться от традиционного подхода и рассуждений о «критических синусах» за счёт перехода на более подробный уровень – непосредственный расчёт напряжений в сжимаемых трубах, характерный для расчётов МКЭ, но по более простым моделям.

Пример расчёта по программе Well Force ZERS 3.0. Для иллюстрации работы расчётного модуля программы Well Force ZERS 3.0 возьмём

теоретический пример из работы [14]: профиль скважины в виде дуги с интенсивностью искривления $\rho=0,1^\circ/\text{м}$ в вертикальной плоскости и глубиной по стволу 1800 м (забой и устье находятся на одной высотной отметке, при этом забой закрыт). Ствол скважины до глубины 900 м обсажен и имеет внутренний диаметр 159,4 мм; в диапазоне глубин 900-1800 м диаметр открытого ствола составляет 142,9 мм. Скважина и внутренняя часть трубы заполнены раствором плотностью $\rho_m=1200 \text{ кг/м}^3$, пластической вязкостью $PV=0,02 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и динамическим напряжением сдвига $DSS=10 \text{ Па}$. Рассмотрим движение обсадной трубы с наружным диаметром 114,3 мм, толщиной стенки 7,37 мм и погонной массой 20 кг/м. Предел текучести материала трубы $\sigma_0=539 \text{ МПа}$, расчётный КЗП=1,5. Труба центрируется с помощью центраторов [3] с наружным диаметром 142 мм и радиальной жёсткостью 600 Н/мм с целевым коэффициентом центрирования 20% и максимальным расстоянием между центраторами 12 м. В отличие от работы [14] рассмотрим здесь более общий случай: продольное движение трубы с одновременным вращением и прокачкой раствора: скорость вращения: $U=0,5 \text{ об/сек}$; скорость продольного движения в диапазоне глубин погружения 0-800 м: $V=0,6 \text{ м/с}$; в диапазоне глубин 800-1800 м: $V=0,2 \text{ м/с}$; расход прокачки раствора в диапазоне глубин погружения 0-1000 м: $Q=0$; в диапазоне глубин 1000-1800 м: $Q=0,02 \text{ м}^3/\text{сек}$.

На **рис.3а,б** представлены расчётные графики веса и крутящего момента на устье при спуске как функция глубины погружения для приведённого выше теоретического примера. На **рис.3в,г** представлены расчётные графики распределения продольной силы и крутящего момента по длине меры для конечной глубины погружения 1800 м. Расчётные графики представлены для различных коэффициентов трения, указанных в легенде, при этом пунктирные графики отражают допускаемые нагрузки: допускаемый вес, допускаемая продольная сила или допускаемый крутящий момент (без учёта ограничений на резьбовое соединение).

Среди результатов, представленных на **рис. 3** можно отметить следующее:

- при уменьшении скорости движения (глубина погружения 800 м) вес на спуск возрастает из-за снижения гидравлических потерь; крутящий момент также возрастает из-за изменения направления действия сил трения (увеличивается их проекция на плоскость, перпендикулярную оси скважины);
- при прокачке раствора (глубина погружения больше 1000 м) вес на спуск снижается из-за того, что в этом примере гидравлические

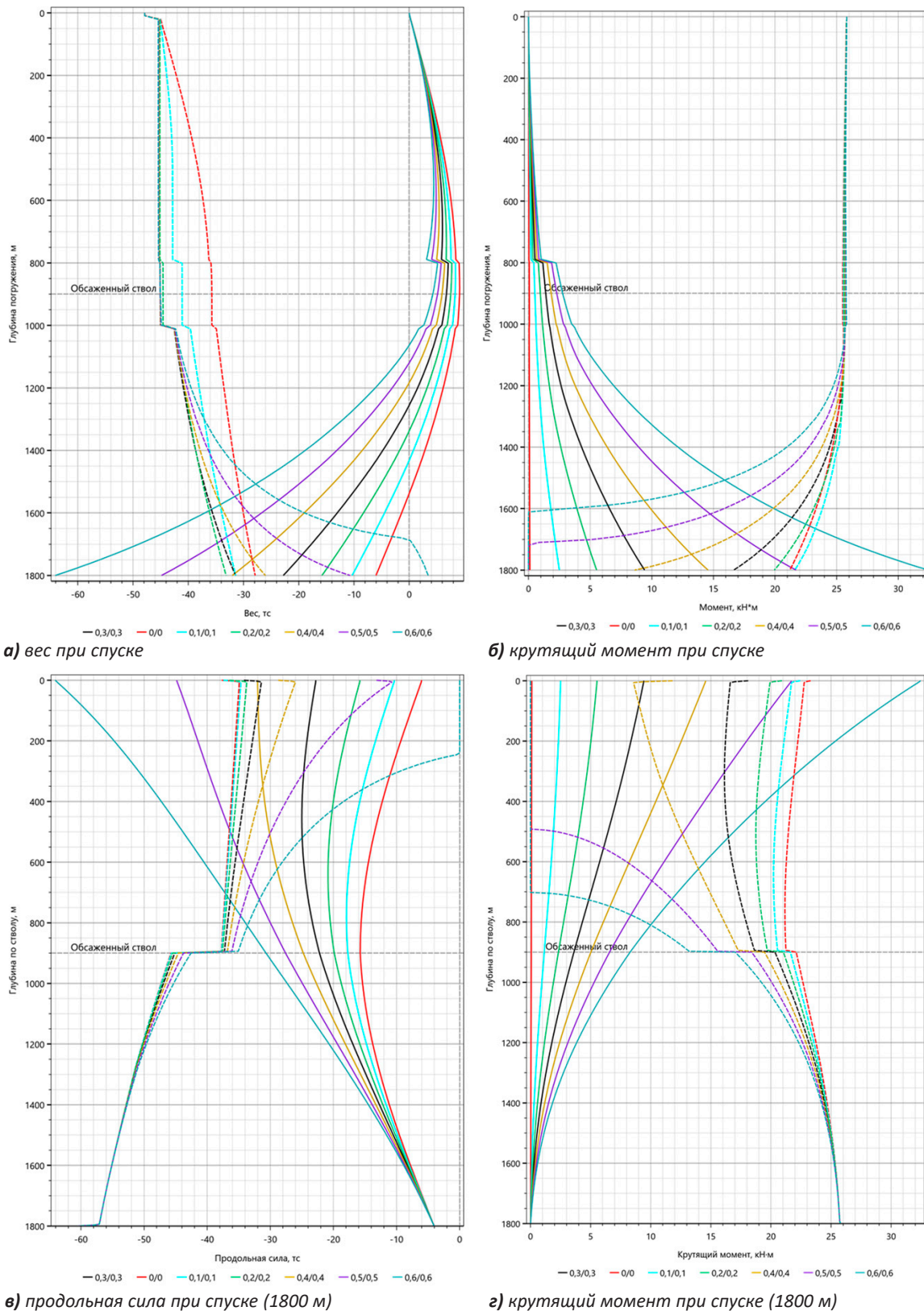


Рис.3. Расчётные графики нагрузок для различных коэффициентов трения (допускаемые нагрузки показаны пунктиром).

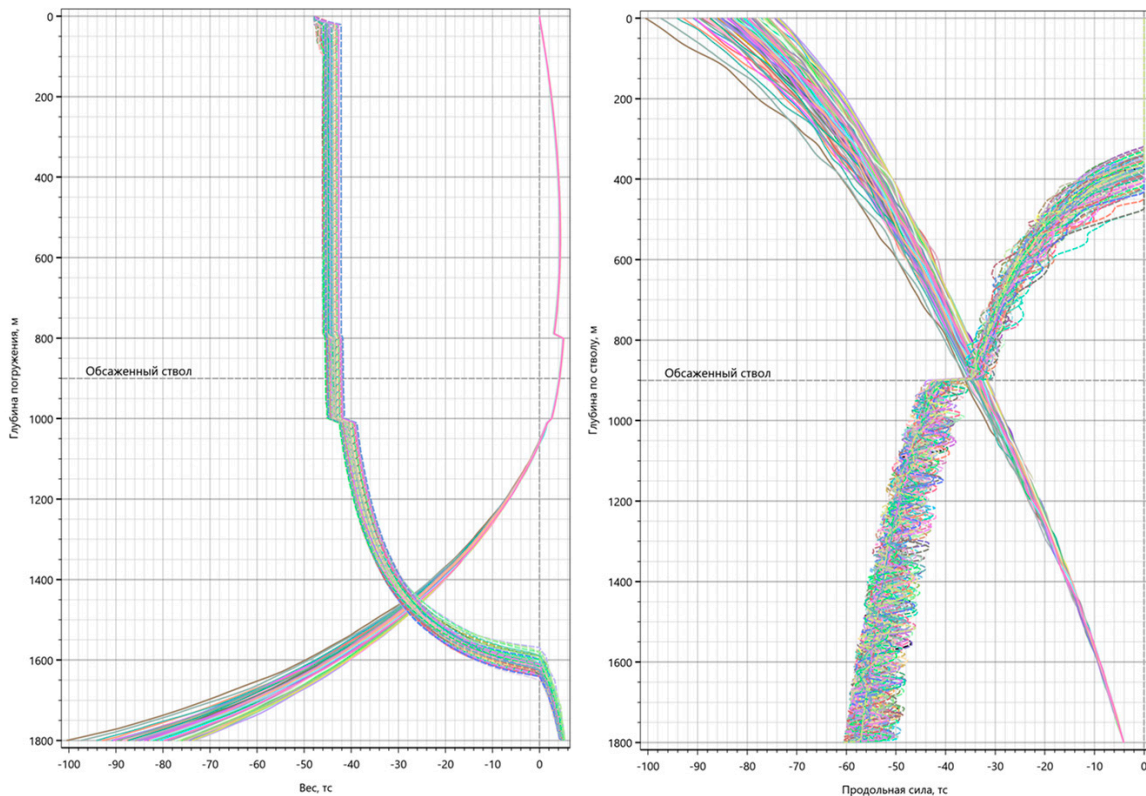


Рис.4.
Расчётные графики – вероятностный анализ ($C_{ff}=0,6$)

потери в затрубном пространстве значительно превышают гидравлические потери в трубном пространстве;

- допускаемые нагрузки, включая допускаемый вес и допускаемый крутящий момент зависят от коэффициентов трения;

- допускаемые нагрузки в обсаженном стволе меньше, чем в открытом из-за его большего диаметра, и, соответственно, больших искривлений труб при их сжатии;

- допускаемый крутящий момент зависит от действующей продольной нагрузки, также, как и допускаемая продольная нагрузка зависит от действующего крутящего момента, поэтому глубина, на которой КЗП становится меньше 1,5 на всех графиках веса, нагрузок и крутящего момента одинаковая для каждого из рассмотренных коэффициентов трения (это подтверждает корректность программной реализации модели);

- при малых глубинах погружения допускаемый вес и допускаемый крутящий момент больше при больших трениях (из-за меньшей величины растягивающей силы в трубах), в то время как при больших глубинах погружения – наоборот (из-за роста максимальной сжимающей силы и крутящего момента в трубах);

- вблизи устья и у забоя допускаемые нагрузки немного больше из-за меньшего искривления трубы;

- прочность трубы с $KЗП=1,5$ обеспечивается только при малых коэффициентах трения: при коэффициенте трения 0,4 и больше сплошные расчётные графики пересекают пунктирные графики того же цвета (построенные для таких же коэффициентов трения).

Предположим, что реальный профиль скважины имеет дополнительное случайное искривление относительно планового интенсивностью от 0 до 0,15 град/м в обсаженном стволе и от 0 до 0,25 град/м – в открытом. Все трубы имеют собственное случайное искривление по первой форме с максимальным прогибом от 0 до 0,2% от длины трубы (11,7 м). В этом случае результаты расчётов будут носить вероятностный характер. На **рис. 4** в качестве примера представлены результаты 100 расчётов для коэффициента трения $C_{ff}=0,6$, в которых учитывалось собственное случайное искривление труб и случайные отклонения профиля скважины от проектного.

Из полученных результатов видно, что учёт случайных отклонений профиля скважины от проектного и учёт собственного искривления труб приводит к росту необходимого усилия проталкивания труб в скважину с ~64 тс (рис. 3а, график «0,6/0,6») до ~85 тс (**рис. 4а**) для глубины погружения 1800 м. Следует отметить постепенное «выползаживание» графиков на **рис. 4а**, что говорит о приближении к момен-

ту заклинивания труб не только вследствие их пластического деформирования, но также и по механизму неограниченного роста контактных сил сжимаемых труб со скважиной.

Результаты, представленные на *рис. 3 и 4*, получены при ограничениях, наложенных на демонстрационную версию программы: $dl=3,0$ м и $Defc\ max=0$. В данном случае это мало сказалось на точности расчёта (за исключением значительного увеличения количества центраторов), т.к. в рассмотренном примере нет коротких элементов меры, зазор между трубами и скважиной сравнительно большой, и центраторы мало влияют на результаты, т.к. их диаметр меньше диаметра скважины, а жёсткость небольшая. Эти

примеры может повторить любой желающий, установив демонстрационную версию программы Well Force ZERS 3.0 на своём компьютере (тестовые примеры «VUQ» и «VUQ-prob»).

Заключение

В статье рассмотрены основные особенности программы Well Force ZERS 3.0 и её отличия от предыдущей версии Well Force 2.0, описанной в работе [1]. Даны пояснения к новым методам расчёта допускаемых нагрузок и напряжённо-деформированного состояния сжимаемых труб, которые реализованы в программе Well Force ZERS 3.0. Работоспособность программы продемонстрирована на тестовых примерах. ❶

Литература

1. Пузанов Д.Н., Чекунов А.И. Возможности и особенности компьютерной программы Well Force 2.0 // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 1(594). – С. 55-67. – DOI: 10.33285/2782-604X-2023-1(594)-55-67 <https://journal.gubkin.ru/journals/automation/2023/1-594/55-67/>
2. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «ЗЭРС» ООО «НТЦ «ЗЭРС». <http://www.zers.ru/>
3. Центратор жестко-упругий ПЦР, «НТЦ «ЗЭРС». <http://www.zers.ru/catalog/osnastka/tsentrator-zhestkoupругiy-ptsr/>
4. Э.В. Бабаян, А.В. Черненко. Инженерные расчёты при бурении. // Библиотека нефтегазодобывчика, Москва, Инфра-инженерия, 2016. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-inzhenernye-raschety-pri-burении.pdf>
5. Пузанов Д.Н. Расчёт гидравлических потерь по программе Well Force 2.0 // Геология и недропользование. – 2022. – № 10. – С. 30–40. https://gkz-rf.ru/sites/default/files/news/xx/files/no_6-2022_geologiya_i_nedropolzovanie.pdf
6. ПК "Инженерные расчёты строительства скважин". – BurSoftProject, 2008. <http://www.burproject.ru/progr.html>
7. WELLPLAN, Halliburton Landmark Graphics Corporation, 2014. <https://www.petroleumengineers.ru/app/9033>
8. Completion (oil and gas wells). Well completion. Материал из Википедии. [https://en.wikipedia.org/wiki/Completion_\(oil_and_gas_wells\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Completion_(oil_and_gas_wells))
9. Пузанов Д.Н. Программа Well Force 2.1. Расчёт допускаемых нагрузок // Геология и недропользование. – 2023. – № 14. – С. 42-55. <https://gkz-rf.ru/ndropolzovanie/zhurnal-geologiya-i-ndropolzovanie-no14-dekabr-2023g>
10. Пузанов Д.Н. Программа Well Force ZERS 3.0. Учёт случайных отклонений и баклинга. Часть 1/3 // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 8(668). – С. 51–63 <https://journal.gubkin.ru/journals/oilfield/2024/8-668/51-63/>
11. ГОСТ 31446-2017 (ISO 11960:2014). Межгосударственный стандарт. Трубы стальные обсадные и насосно-компрессорные для нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия. Москва, Стандартинформ, 2017г. <https://www.uralcs.com/files/GOST/31446-2017.pdf>
12. ГОСТ 32696-2014 (ISO 11961:2008). Межгосударственный стандарт. Трубы стальные буровые для нефтяной и газовой промышленности. Технические условия. Москва, Стандартинформ, 2015г. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293762/4293762196.pdf>
13. Пузанов Д.Н. Особенности компьютерной программы WellForces_1. // Геология и недропользование. – 2021. – № 3. – С. 42-48. https://gkz-rf.ru/sites/default/files/news/xx/files/no_3-21_geologiya_i_nedropolzovanie_10mb.pdf
14. Пузанов Д.Н., Чекунов А.И. Тестирование механического модуля программы Well Force 2.0. // Геология и недропользование. – 2023. – № 12. – С. 173–188. https://gkz-rf.ru/sites/default/files/news/xx/files/geologiya_i_nedropolzovanie_no_2-2023.pdf
15. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопrotивление материалов. - М.: Высшая школа, 1975, https://scask.ru/q_book_sopr.php?id=86
16. von Mises yield criterion. Материал из Википедии — свободной энциклопедии, https://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion
17. В.И. Феодосьев. Сопrotивление материалов, <https://studizba.com/files/show/djvu/3612-1-feodos-ev-v-i-soprotivlenie-materialov.html>
18. Ergun Kuru, Alexander Martinez, Stefan Miska, Weiyong Qiu. The Buckling Behavior of Pipes and Its Influence on the Axial Force Transfer in Directional Wells. Journal of Energy Resources Technology. SEPTEMBER 2000, Vol. 122, p. 129-135.
19. Arthur Lubinski, W.S. Althouse, J.L. Logan. Helical Buckling of Tubing Sealed in Packers. Journal of petroleum technology, June 1962, p. 655-670.
20. Wenjun Huang, Deli Gaob, Yinghua Liua, MOE Key. A study of tubular string buckling in vertical wells. International Journal of Mechanical Sciences. Volume 118, November 2016, p. 231-253, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740316303216>
21. ANSYS. Ansys - универсальная программная система анализа методом конечных элементов. Материал из Википедии, <https://ru.wikipedia.org/wiki/ANSYS>
22. MSC Marc. MSC Marc is a nonlinear finite elements analysis software. Материал из Википедии, https://en.m.wikipedia.org/wiki/MS_C_Marc
23. Пузанов Д.Н., Савин В.И. Программа Well Force ZERS 3.0. Учёт случайных отклонений и баклинга. Часть 2/3. // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 9(669). – С. 48–58, <https://journal.gubkin.ru/journals/oilfield/2024/9-669/48-58/>

UDC: 622.245, 519.677, 531, 532

D.N. Puzanov Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Calculations and Modeling, LLC «NTC ZERS», pdn@zers.ru
A.I. Chekunov leading software engineer, LLC «NTC ZERS»; werymag@mail.ru

A BRIEF OVERVIEW OF THE WELL FORCE ZERS 3.0 PROGRAM

Abstract: The Well Force ZERS 3.0 computer program was developed at LLC “NTC ZERS” (certificate of registration №2024612271 dated 30.01.2024) and is designed to perform calculations of loads and pressures during operations related to well completion. Unlike the previous version of Well Force 2.0 [1], Well Force ZERS 3.0 has a new database logic that does not require Microsoft Access. The program interface allows you to work with the «Reference Books» containing the parameters of equipment and pipes in a separate tab of the program – using the built-in editor. The Well Force ZERS 3.0 program also allows you to quickly change settings and exchange data – both with and without a remote server. The main differences of calculation module of the Well Force ZERS 3.0 program from the previous version are a new method for calculating permissible loads, implemented in the most complete formulation, as well as a new method for calculating the stress-strain state of compressible pipes, taking into account their own curvature. These circumstances give Well Force ZERS 3.0 an advantage over competitors and are discussed in the article along with demonstration examples. At the moment, the development of the Well Force ZERS 3.0 program has been completed and its demo (unlicensed) version, along with supporting materials, is available at: <http://programs.werymag.ru/Programs>. The program description and presentation are available to users after installing the program.

Keywords: well, casing string, hydraulic losses, centralizer, hook weight, permissible weight, equivalent stress, buckling, friction coefficient.