



**ООО «ЛУКОЙЛ-ИНЖИНИРИНГ»**

**«ИНТЕГРИРОВАННОЕ  
НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
НЕФТЕГАЗОВЫХ АКТИВОВ:  
ОПЫТ, ИННОВАЦИИ,  
ПЕРСПЕКТИВЫ»**

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ  
КОНФЕРЕНЦИИ**

**2021 г.**

ООО «ЛУКОЙЛ-ИНЖИНИРИНГ»

**«ИНТЕГРИРОВАННОЕ НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
НЕФТЕГАЗОВЫХ АКТИВОВ:  
ОПЫТ, ИННОВАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ»**

СБОРНИК ДОКЛАДОВ III МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ISBN 978-5-7934-0999-5

Сыктывкар  
Коми республиканская типография  
2021 г.

УДК 622.276  
ББК 33.361  
И73

И73 «Интегрированное научное сопровождение нефтегазовых активов: опыт, инновации, перспективы». Сборник докладов III Международной научно-практической конференции / [Электронное издание] – Сыктывкар: Коми республиканская типография, 2021. – 500 стр.

Proceedings – III-rd International Scientific and Practical Conference “Integrated Research Support to Oil and Gas Assets: Experience, Innovations, Prospects”, 2021.

ISBN 978-5-7934-0999-5

В сборнике представлены материалы III Международной научно-практической конференции «Интегрированное научное сопровождение нефтегазовых активов: опыт, инновации, перспективы», проходившей с 20 – по 22 октября 2021 года (г. Пермь). Включенные в сборник материалы отражают теоретические аспекты, практический опыт, современные тенденции и разработки по таким актуальным направлениям, как цифровые месторождения, инновационные решения и технологии при разработке нефтяных месторождений, декарбонизация, цифровизация и новые технологии строительства скважин на суше и на море, цифровые технологии в геологии.

Сборник докладов будет интересен представителям нефтяной и газовой отраслей, научным работникам, а также нефтяникам широкого профиля.

УДК 622.276  
ББК 33.361

## Совершенствование программных средств для расчетов потерь давления в циркуляционной системе скважины

### Improvement of Software Applications for Calculating Pressure Losses along a Mud-Circulating System

Лосев А.П., Гаджиев С.Г., Лепешкин С.Н., Булах А.М., Евдокимов И.Н.

Lovev A.P., Gadjiev S.G., Lepeshkin S.N., Bulakh A.M., Evdokimov I.N.

#### Аннотация

Дан общий критический обзор нормативных документов, регламентирующих гидравлические расчеты при различных операциях строительства скважин. Указано на нестыковки в стандарте API 13D. Приведен опыт оптимизации расчетных алгоритмов, реализованных в оригинальной программе для гидравлических расчетов бурения DiPC Engineer. Описаны способы оптимизации скорости вычислений для расчета координат точек профиля скважины, интерполяции профиля скважины, для итерационного расчета допустимых скорости и ускорения талевого блока при выполнении спускоподъемных операций в скважине с анализом совместимости давлений по всему открытому стволу. Описана схема интеграции программы с технологическими базами данных. При полной информационной достаточности данных во внешней базе, возможен автоматический расчет по заранее заданному типу технологической операции и реологической модели.

#### Abstract

Authors perform a critical review about the standards relating hydraulic calculations for different drilling operations, point on several omissions in the API 13D standard. The experience on optimization of computational algorithms for the DiPC Engineer software application is described. It is shown how to optimize computation time for the tasks of trajectory points coordinates by minimum curvature method, of trajectory points' interpolation, of iterative calculating permissible velocity and acceleration of travelling block at running-in-hole/pulling-out-of-hole with pressures' compatibility analysis along all open hole. The scheme of software integration with technological databases is presented. A fully automatic computation may be performed only when a user pre-specify a type of a drilling operation and a rheological model, and only with full information sufficiency of data from an external customer database.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ГИДРАВЛИКА, РАСЧЕТЫ, ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ, ДАВЛЕНИЕ, ПРОМЫВКА СКВАЖИНЫ, ПРОМЫВОЧНАЯ ЖИДКОСТЬ, ПРОФИЛЬ, АЛГОРИТМ, СПУСКОПОДЪЕМНЫЕ ОПЕРАЦИИ

**KEYWORDS:** HYDRAULICS, CALCULATIONS, PRESSURE LOSSES, PRESSURE, WELL CIRCULATION, DRILLING FLUID, TRAJECTORY, ALGORITHM, TRIPPING OPERATIONS

С развитием персональных вычислительных устройств полевые инженеры, ранее оперировавшие физически понятными номограммами и схемами, все больше доверяют данным из специальных компьютерных приложений, в которых алгоритмы расчета, как правило, скрыты. Тем самым, рядовые специалисты вынуждены страдать от так называемого «синдрома дорогостоящего оборудования», которое должно априори всегда работать правильно. В отношении программного обеспечения (ПО) по расчету давлений при промывке скважин ярким примером служит искаженная информация многих производителей программ о расчетах с использованием реологической модели Гершеля-Балкли по стандарту API RP 13D [1], хотя в самом стандарте подчеркивается отсутствие каких-либо аналитических решений в отношении потерь давления для этой реологической модели.

Сложности с выбором алгоритма расчета потерь давления связаны с тем, что эта сфера не регламентирована отраслевыми нормативными документами, в отличие от, например, расчетов обсадных колонн на прочность. Несколько лет назад был «гармонизирован» стандарт на основные требования к ПО для проектирования строительства скважин [2], в котором, к примеру, указано требование «учета <...> теплообмена в трубах, теплопроводности земли, теплоемкости земли <...>», то есть тех данных, которые можно оценить при проектировании, но получить в ходе полевой работы – никогда. Но главное, что в указанном документе так и не дается ссылка на методику расчета. Общий критический обзор нормативных документов, регламентирующих расчеты при различных операциях строительства скважин, показал, что единственные общие указания можно найти лишь только в Правилах безопасности [3], в которых постулируется, что каждый технологический процесс должен иметь технологический регламент, разработанный проектной организацией и согласованный главным инженером эксплуатирующей организации. При этом любые используемые на объекте технические устройства и материалы (в том числе ПО) должны соответствовать технологическому регламенту и подвергаться контролю качества. Иными словами, Правила [3] возлагают обязанность поиска и утверждения (верификации) алгоритмов расчетов ПО на проектную организацию, и обязанность контроля качества (соответствия) ПО на организацию, эксплуатирующую опасный производственный объект.

В практике своей деятельности авторы доклада еще не сталкивались с технологическими регламентами, указывающими на использование определенного ПО или алгоритма расчета потерь давления (и тем более не встречали данных о верификации ПО). Поэтому для собственного разрабатываемого ПО использовали алгоритмы из рецензируемых работ, многократно проверен-

ных отраслевыми специалистами [1, 4-6, 10]. Для промывочных жидкостей с высоким содержанием дисперсной фазы (эмульсии, утяжеленные жидкости), описываемых реологической моделью Гершеля-Балкли, был предложен собственный способ расчета коэффициентов гидравлических сопротивлений, предусматривающий использование данных с кривой течения для конкретной скорости сдвига в рассматриваемом сечении ствола и проведение расчета по схеме модели Шведова-Бингама [7].

Разработанная авторами программа DiPC Engineer [8] реализует алгоритм расчета, заключающийся в задании однозначной схемы расчета траектории скважины (с учетом реализации интерполяций по длине и вертикали), в делении скважины на однородные по диаметрам интервалы, в расчете скорости сдвига и температуры в каждом интервале, в расчете плотности и реологических параметров, в определении режима течения, в расчете параметров профиля скоростей потока (модели Шведова-Бингама, Оставльда и приближение к Гершеля-Балкли), в расчете потерь давления и суммировании потерь. Изложенные положения защищены свидетельством о регистрации ПЭВМ в ФИПС и приказом Минцифры РФ о включении программы в Реестр российских программ для ЭВМ.

Подробное разбиение скважины на интервалы повышает точность, но неизбежно увеличивает продолжительность расчета, даже на современных процессорах. Область применения ПО – не только проектирование, но и оперативное сопровождение строительства скважины, поэтому авторы работы постоянно совершенствуют расчетные схемы с целью оптимизации времени.



Рисунок 1 – Схема, иллюстрирующая необходимость интерполяции: по длине – при изменении диаметров конструкции или КНБК, по вертикальной глубине – при изменении кавернозности.

Приведен опыт оптимизации расчетных алгоритмов, реализованных в оригинальной программе для гидравлических расчетов бурения. В частности, описаны способы оптимизации скорости вычислений для следующих задач:

- расчет координат точек профиля скважины (длина по стволу, зенитный

угол, азимутальный угол, глубина по вертикали, отход на север, отход на восток) по методу кольцевых дуг минимальной кривизны;

- интерполяция профиля скважины, построенного методом кольцевых дуг минимальной кривизны, по заданной длине ствола и по заданной вертикальной глубине (рис. 1);

- итерационный расчет допустимых скорости и ускорения талевого блока при выполнении спускоподъёмных операций (СПО) в скважине с анализом совместимости давлений по всему открытому стволу.

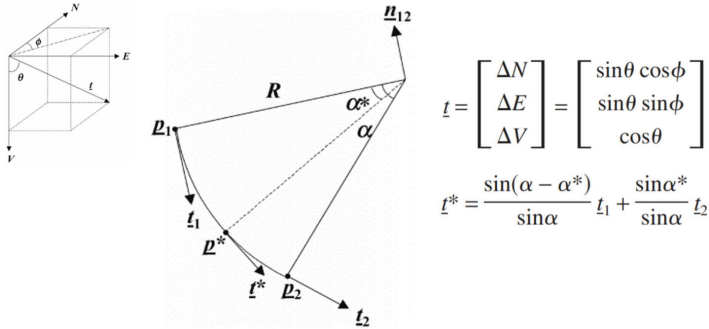


Рисунок 2 – Схема к расчету интерполяции по длине скважины. Адаптировано из работы [4].

Для алгоритмов расчета профиля скважины выявлены и имплементированы ограничительные требования к исходным данным, такие как обязательное задание экстремальных точек профиля (с зенитным углом  $90^\circ$ ) и точек поворота профиля по азимуту (точек с азимутальными углами, кратными  $90^\circ$ ), иначе вычислительный алгоритм не смог бы самостоятельно определить сектор расположения дуги. См. рис. 2 – для вычисления  $\alpha^*$  и  $p^*$  при интерполяции по длине необходимы функции арксинуса и арккосинуса. Интерполяция по вертикальной глубине предполагает решение системы уравнений, корни которой требуют проверки на адекватность. Предложен способ сокращения количества вычислительных операций при интерполяции профиля на заданную глубину по вертикали, заключающийся в предварительном расчете профиля методом кольцевых дуг минимальной кривизны с максимальной детализацией (интервал детализации короче элемента компоновки) и в последующем использовании линейных интерполяций.

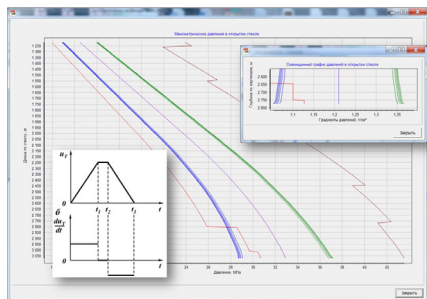


Рисунок 3 – Зависимость манометрических давлений от глубины при спуске и подъеме одной свечи, полученная в программе DIPIC Engineer [8].

При прогнозе инерционных давлений в ходе спускоподъемных операций в наиболее распространенных гидравлических программах принято считать давления от СПО только одной свечи при наиболее глубоком положении КНБК (рис. 3) при фиксированном ускорении и разных скоростях талевого блока. Совмещенный график давлений при этом именуется «веником», так как кривые давлений для разных скоростей расходятся в нижней части диаграммы (вставка справа на рис. 3). С учетом динамики талевого блока в ходе СПО, как показано на вставке слева рис. 3, подробный анализ должен был бы включать изменения ускорения и скорости талевого блока, да и самое глубокое положение КНБК не всегда создает худшую ситуацию, особенно в сильно искривленных скважинах – то есть необходимо иметь результаты для любого положения КНБК. Схема расчета, учитывающая поэтапный спуск или подъем буровой колонны, подбор скорости и ускорения талевого блока (рис. 4), была реализована в программе. Итерационный подбор скорости и ускорения талевого блока с анализом совместимости по давлениям вдоль всего необсаженного ствола для ряда скважин занимал довольно длительное время (например, для скважины длиной 3000 м, с использованием реологической модели Оствальда на процессоре Intel Core i5-2467M 1,6 ГГц с ОЗУ 8 Гб – до 40-60 минут).



Рисунок 4 – Схема расчетных циклов для определения инерционных давлений при СПО.



Для алгоритмов итерационного расчета скорости и ускорения талевого блока при СПО выявлены способы сокращения количества вычислений, заключающиеся в выполнении предварительных расчетов с граничными исходными данными (максимальными и минимальными скоростью и ускорением), а также в оптимизации численных схем расчета эпюр линейных скоростей бурового раствора в кольцевом пространстве для реологических моделей Оствальда, Шведова-Бингама и для приближенной расчетной схемы по модели Гершеля-Балкли. Использованные приемы позволили оптимизировать время счета до минут.

Совершенствование ПО проводится не только в части оптимизации программного кода и математических алгоритмов. С учетом возрастающего интереса пользователей к интеграции инженерных программных приложений с обширными производственными базами данных (БД), был спроектирован модуль импорта/экспорта данных из внешней базы заказчика (рис. 5).



Рисунок 5 – Блок-схема модуля импорта данных из внешней базы заказчика.

Проведение гидравлических расчетов по исходным данным из внешних БД возможно только при полной информационной достаточности. Если технологическая база формируется только на основании перечня данных из ГОСТ Р 58141-2018 [9], этого недостаточно. Для проведения расчетов, например, с учетом температуры, потребуются дополнительные сведения, которые придется вводить вручную. Основные положения процедуры импорта/экспорта данных следующие.

Программа DiPC Engineer реализует сложные математические алгоритмы, занимающие определенное время работы процессора, поэтому мгновенная обработка информации в так называемом режиме «on-line» невозможна.

Последовательность взаимодействия может быть реализована следующим порядком:

- 1) на предварительном этапе заказчик определяет реологическую модель и тип расчета (какие параметры необходимо получить);

2) проводится анализ внешней базы заказчика на полноту, структуру и типы данных;

3) при наличии всей необходимой информации проводится разработка и утверждение таблицы соответствия и структурной схемы выгрузки-загрузки данных;

4) администратор БД заказчика готовит модуль выгрузки-загрузки;

5) проводится отладка интеграции.

Импорт данных из внешней базы может быть реализован по следующей схеме рис. 5. На основании таблицы соответствия модуль программы импорта DiPC Engineer получает подготовленный файл с оперативными данными из внешней базы заказчика. Проводится проверка полноты данных и перезапись в базу данных DiPC. По заказанному типу расчета запускается процесс анализа данных и вычислений. Данные анализируются на физические пределы, пределы математических моделей (допустимые значения, ограничения). При успешной проверке производится расчет и формирование файла отчета (для загрузки во внешнюю базу заказчика).

При полной информационной достаточности данных во внешней базе и положительной программной проверке исходных данных в DiPC, возможен автоматический расчет по заранее заданному типу (технологическая операция, параметры) и реологической модели.

## Источники

1. API RP 13D. Rheology and Hydraulics of Oil-well Drilling Fluids. 7th ed. – Washington, DC: API Publishing Services, 2017. – 98 p.
2. ГОСТ Р 57122-2016 Месторождения газовые, газоконденсатные, нефтегазовые и нефтегазоконденсатные. Программное обеспечение для проектирования строительства скважин. Основные функциональные и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности». – М.: Ростехнадзор, 2020. – 522 с.
4. Sawaryn S.J., Thorogood J.L. (2005) A Compendium of Directional Calculations Based on the Minimum Curvature Method. SPE 84246. SPE Drilling & Completion, March, pp. 24-36.
5. Arnold F.C. (1990) Temperature Variation in a Circulating Wellbore Fluid. J.En.Res.Tech., June, vol. 112, pp. 79-83.
6. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. (1997) Development of a New Cuttings-Transport Model for HighAngle Wellbores Including Horizontal Wells. SPE Drilling & Completion, June, pp. 129-135.
7. Обоснование реологической модели утяжеленных буровых растворов на углеводородной основе для гидравлических расчетов / С.Г. Гаджиев [и др.] // Бурение и нефть. – 2017. – №7-8. – С. 66-71.

8. Булах, А.М. Программа для ЭВМ DiPC Engineer. Руководство пользователя / А.М. Булах, С.Н. Лепешкин, А.П. Лосев – М.: ООО НИИЦ «Недра-тест», 2019. – 148 с.
9. ГОСТ Р 58141-2018 Проектирование и освоение газовых, газоконденсатных, нефтегазовых и нефтегазоконденсатных месторождений. Движение геолого-технологической информации в процессе строительства скважин. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
10. Леонов, Е.Г. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: в 2 ч. Ч. 1: Гидроаэромеханика в бурении / Е. Г. Леонов, В. И. Исаев. – М.: Недра, 2006. – 413 с.

Научное издание

**«ИНТЕГРИРОВАННОЕ НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
НЕФТЕГАЗОВЫХ АКТИВОВ:  
ОПЫТ, ИННОВАЦИИ, ПЕРСПЕКТИВЫ»**

Сборник докладов  
III Международной научно-практической конференции  
Город Пермь, 20-22 октября 2021 г.

Издается в авторской редакции  
Техническая подготовка и обработка материалов: Е.В. Курчатова

Подписано в печать 20.12.2021 г. Формат 60\*84/16.  
Усл. печ. л. 17,9. Электронный вариант. Заказ № 21-9557.  
ООО «Коми республиканская типография».  
167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Савина, д. 81.  
Тел. 28-46-71. E-mail: knigikomi@komitip.ru

