На правах рукописи

Руководство пользователя

Unifloc 7 VBA

Unifloc 7.31 VBA

Внимание!!!
Unifloc 7.31 VBA - переходная версия с большим количеством изменений относительно 7.25
В описании возможно наличие большого числа неточностей.
Смотрите код или используйте версию 7.25!

Москва 2021

История и авторы.

Расчетные модули Unifloc 7.31 VBA развивались в различных версиях в течении длительного периода времени примерно с 2001 года. Первая версия (условно) - это расчет потенциала добычи нефти для технологического режима добывающих скважин выполненный под руководством Хасанова М.М. Форма технологического режима добычи нефти или форма расчета потенциала уже была разработана и применялось на тот момент. Но она использовала расчет забойного давления по формуле $P_{intake} = P_{cas} + \rho_o g(H_{pump} - H_{dyn})$, с постоянным значением $\rho_o = 0.86$, что давало большую погрешность на ряде скважин. В первой версии унифлок появился забойного давления по динамическому уровню по оригинальной методике [1]. Тогда же была сформирована база расчетов PVT корреляций, которая была включена в расчетные модули [2]. Эта версия широко распространилась и ее можно встретить в различных компаниях. Дальше модули развивались под различные задачи разными коллективами, и единой системы версий не существовало. Поэтому текущая система версий основана на тех проектах, в которых я принимал непосредственное участие. Вторая версия представляет собой набор расчетных модулей для анализа работы фонтанирующих скважин, анализа отжима динамического уровня [3; 4]. Появились расчеты по разным многофазным корреляциям [5; 6]. По названию корреляции - унифицированной TUFFP появилось и название unifloc (**uni**fied **flo**w **c**orrelation). Третья версия появилась примерно тогда же. В ней были попытки расчета скважин с УЭЦН. С ее помощью были подготовлены работы [7—9]. Но эта версия расчётных модулей не получила широкого распространения в то время, хотя эти расчётные модули ещё можно найти. К четвёртой версии расчётов можно отнести группу расчётных модулей имеющих общее название - шаблоны применения технологий механизированной добычи. [10; 11]. Некоторые из них до сих пор применяются в компаниях. Пятая версия разрабатывалась уже в компании Газпромнефть. Это в основном расчёты газлифтного фонда скважин. и адаптация расчётных модулей для проведения инженерных расчетов в различных информационных системах [12; 13] . Шестая версия - различные варианты расчёта сделанные на основе предыдущих, но не получившие широкого распространения (расчет динамического уровня по данным эхолокации, расчёта давления в паронагнетательной скважине и тому подобное). Все эти версии в основном носили прикладной характер и создавались для решения определённых задач. Седьмая, текущая версия информационной системы создавалась для задач обучения, что отличает ее от остальных. Она ориентирована как на обучение студентов ВУЗов (использовалась для проведения курсов в РГУ

нефти и газа имени И.М.Губкина, МФТИ, РЭШ), так и на обучение специалистов в ходе коротких курсов повышения квалификации. Эта версия сильно отличается от предыдущих. Исходный код переписан чуть менее чем полностью, проведён рефакторинг методик и алгоритмов, созданы два уровня API - на уровне классов и пользовательских функций, создана и развивается документация. При этом значительная часть функциональности предыдущих версий не реализована. Реализованы только базовые алгоритмы и методики. Большой вклад в развитие текущей версии внесли студенты и аспиранты кафедры РиЭНМ РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина. Историю развития проекта можно проследить в репозитории на гитхабе.

Авторы Unifloc 7.31 VBA

- Хабибуллин Ринат
- Краснов Виталий
- Горидько Кирилл
- Халиков Руслан
- Водопьян Алексей
- Киян Артем
- Кобзарь Олег
- Шабонас Артур
- Полешко Михаил

Оглавление

Стр.

Введение 11

Глава 1. Макросы VBA для проведения расчётов 12
1.1 Работа с VBA 12
1.1.1 Ручной запуск надстройки 12
1.1.2 Установка надстройки для автоматического запуска 13
1.1.3 Редактор VBE 14
1.1.4 Некоторые особенности VBA 14
1.2 Соглашения по названию функций и переменных Unifloc 7.31 VBA 15
1.3 Строковые переменные и параметры 16
1.3.1 Строковая переменная - словарь 16
1.3.2 Строковая переменная - список или массив 17
1.4 Параметры расчетных пользовательских функций - param 17
1.5 Модель пласт - скважина - скважинное оборудование 18

Глава 2. PVT - свойства флюидов и потока флюидов 20
2.1 Модель физико-химических свойств потока флюидов в Unifloc 7.31 VBA 20
2.1.1 Статичные PVT параметры 21
2.1.2 Динамические PVT параметры 22
2.2 Выбор набора PVT корреляций 24
2.3 Стандартные условия 27
2.4 Кодирование PVT свойств в строке. 28
2.5 Преобразования потоков флюидов 31
2.5.1 feed_mod_separate_gas – сепарация части свободного газа из потока 31
2.5.2 feed_mod_split – разделение двух потоков флюидов 37
2.5.3 feed_mod_mix – смешивание двух потоков флюидов 38
2.6 Соотношение некоторых свойств пластовых флюидов 38
2.6.1 PVT_pb_atma давление насыщения 42

Стр.

2.6.2 PVT_rs_m3m3 – газосодержание 43
2.6.3 PVT_bo_m3m3 – объёмный коэффициент нефти 45
2.6.4 PVT_bg_m3m3 – объёмный коэффициент газа 47
2.6.5 PVT_bw_m3m3 – объёмный коэффициент воды 48
2.6.6 PVT_mu_oil_cP – вязкость нефти 49
2.6.7 PVT_mu_gas_cP – вязкость газа 50
2.6.8 PVT_mu_wat_cP – вязкость воды 51
2.6.9 PVT_rho_oil_kgm3 – плотность нефти 52
2.6.10 PVT_rho_gas_kgm3 – плотность газа 53
2.6.11 PVT_rho_wat_kgm3 – плотность воды 54
2.6.12 PVT_Z – коэффициент сверхсжимаемости газа 55

Глава 3. Многофазный поток в трубах, штуцере 59
3.1 Расчёт свойств потока 59
3.1.1 feed_q_mix_rc_m3day – расход газожидкостной смеси 59
3.1.2 feed_rho_mix_kgm3 – плотность газожидкостной смеси . . . 60
3.1.3 feed_gas_fraction_d – доля газа в потоке 60
3.1.4 feed_p_gas_fraction_atma – целевое давления для заданной доли газа в потоке 61
3.1.5 feed_rp_gas_fraction_m3m3 – целевой газовый фактор для заданной доли газа в потоке 62
3.2 Сепарация газа в скважине 63
3.2.1 well_ksep_natural_d – естественная сепарация газа 64
3.2.2 well_ksep_total_d – общая сепарация газа 66
3.3 Расчёт многофазного потока в штуцере 67
3.3.1 MF_choke_p_atma – Расчет давления на входе или на выходе штуцера 70
3.3.2 MF_choke_q_sm3day – функция расчёта дебита жидкости через штуцер 74
3.3.3 MF_choke_calibr_fast – простая и быстрая функция настройки модели штуцера 77
3.3.4 MF_choke_calc – расчет штуцера с полным выводом 79
3.3.5 MF_choke_calibr – продвинутая функция настройки модели штуцера 82

Стр.

3.4 Расчет многофазного потока в трубе 86
3.4.1 Задание конструкции трубы `encode_pipe` 87
3.4.2 Задание температурных параметров для расчета трубы `encode_t_model` 87
3.4.3 Задание многофазной корреляции для расчета распределения давления 89
3.4.4 MF_pipe_p_atma – функция расчета распределения давления в трубе 91
3.4.5 MF_dpdl_atmm – функция расчета градиента давления по многофазной корреляции Ансари 95

Глава 4. Многофазный поток в пласте и призабойной зоне 97
4.1 Расчет многофазного потока в пласте 97
4.1.1 IPR_pi_sm3dayatm – расчёт продуктивности 99
4.1.2 IPR_p_wf_atma – расчёт забойного давления по дебиту и продуктивности 100
4.1.3 IPR_q_liq_sm3day – расчёт дебита по забойному давлению и продуктивности 101

Глава 5. Модель УЭЦН 102
5.1 Расчёт УЭЦН 102
5.1.1 База характеристик ЭЦН 106
5.1.2 ESP_head_m – расчёт номинального напора ЭЦН 109
5.1.3 ESP_eff_fr – расчёт номинального КПД ЭЦН 111
5.1.4 ESP_power_W – расчёт номинальной мощности потребляемой ЭЦН 112
5.1.5 ESP_id_by_rate – выбор типового насоса по номинальному дебиту 113
5.1.6 ESP_p_atma – расчёт распределения давления в ЭЦН 114

Глава 6. Старые функция расчёта технологического режима добывающих скважин 120
6.1 Технологический режим добывающих скважин 120

Стр.

6.1.1 old_pwf_calc_atma – расчёт забойного давления по динамическому уровню . . . 121
6.1.2 old_pwf_calc_p_intake_atma – расчёт забойного давления по давлению на приеме . . . 121
6.1.3 old_Ppump_calc_atma – расчёт давления на приеме по динамическому уровню . . . 122
6.1.4 old_Potential_Pwf_atma – расчёт целевого забойного давления по доле газа . . . 122
6.1.5 old_BB_Pwf_atma – расчёт забойного давления фонтанирующей скважины по буферному давлению . . . 122
6.1.6 old_BB_Pwf_Pin_atma – расчёт забойного давления по давлению на приеме по корреляции Беггса-Брилла . . . 123

Единицы измерений . . . 125

Список сокращений и условных обозначений . . . 126

Словарь терминов . . . 127

Список литературы . . . 129

Приложение А. Автоматически сгенерированное описание . . . 133
A.1 crv_fit_linear . . . 134
A.2 crv_fit_poly . . . 134
A.3 crv_fit_spline_1D . . . 135
A.4 crv_interpolation . . . 136
A.5 crv_interpolation_2D . . . 137
A.6 crv_intersection . . . 137
A.7 crv_parametric_interpolation . . . 138
A.8 crv_solve . . . 139
A.9 decode_json . . . 140
A.10 decode_json_crv . . . 140
A.11 decode_json_k_sep . . . 141
A.12 decode_json_pt . . . 141
A.13 decode_json_p_atma . . . 141

Стр.

A.14 decode_json_q_liq_sm3day 142
A.15 decode_json_t_C 142
A.16 Ei 142
A.17 encode_ambient_formation_string 142
A.18 encode_arange 143
A.19 encode_ESP_cable 144
A.20 encode_ESP_motor 144
A.21 encode_ESP_pump 145
A.22 encode_ESP_separation 146
A.23 encode_feed 147
A.24 encode_feed_list 147
A.25 encode_json 148
A.26 encode_pipe 148
A.27 encode_PVT 149
A.28 encode_table_json 150
A.29 encode_t_model 150
A.30 encode_well_construction_string 150
A.31 ESP_calc 151
A.32 ESP_eff_fr 152
A.33 ESP_gassep_ksep_d 153
A.34 ESP_head_m 154
A.35 ESP_id_by_rate 154
A.36 ESP_motor_calc_mom 155
A.37 ESP_motor_calc_slip 155
A.38 ESP_motor_nameplate 156
A.39 ESP_name 156
A.40 ESP_optRate_m3day 156
A.41 ESP_power_W 157
A.42 ESP_p_atma 157
A.43 ESP_rate_max_sm3day 158
A.44 ESP_system_calc 159
A.45 E_1 160
A.46 feed_calc 160

Стр.

A.47 feed_cJT_Katm 161
A.48 feed_gas_fraction_d 161
A.49 feed_mod_mix 162
A.50 feed_mod_separate_gas 162
A.51 feed_mod_split 163
A.52 feed_mu_mix_cP 163
A.53 feed_p_gas_fraction_atma 164
A.54 feed_q_mix_rc_m3day 164
A.55 feed_rho_mix_kgm3 165
A.56 feed_rp_gas_fraction_m3m3 165
A.57 GLV_p_atma 166
A.58 GLV_q_gas_sm3day 166
A.59 GL_decode_string 167
A.60 GL_encode_string 167
A.61 IPR_pi_sm3dayatm 168
A.62 IPR_pq_crv 168
A.63 IPR_p_wf_atma 169
A.64 IPR_q_liq_sm3day 169
A.65 MF_choke_calibr 170
A.66 MF_choke_calibr_fast 170
A.67 MF_choke_pq_crv 171
A.68 MF_choke_p_atma 172
A.69 MF_choke_q_sm3day 173
A.70 MF_dpdl_atmm 174
A.71 MF_pipe_p_atma 175
A.72 PVT_bg_m3m3 176
A.73 PVT_bo_m3m3 176
A.74 PVT_bw_m3m3 177
A.75 PVT_calc 177
A.76 PVT_compressibility_gas_1atm 178
A.77 PVT_compressibility_oil_1atm 178
A.78 PVT_compressibility_wat_1atm 179
A.79 PVT_cp_gas_JkgC 179

Стр.

A.80 PVT_cp_oil_JkgC 180
A.81 PVT_cp_wat_JkgC 180
A.82 PVT_cv_gas_JkgC 181
A.83 PVT_mu_gas_cP 181
A.84 PVT_mu_oil_cP 182
A.85 PVT_mu_wat_cP 182
A.86 PVT_pb_atma 183
A.87 PVT_rho_gas_kgm3 183
A.88 PVT_rho_oil_kgm3 183
A.89 PVT_rho_wat_kgm3 184
A.90 PVT_rs_m3m3 184
A.91 PVT_salinity_ppm 185
A.92 PVT_ST_liqgas_Nm 185
A.93 PVT_ST_oilgas_Nm 186
A.94 PVT_ST_watgas_Nm 186
A.95 PVT_z 187
A.96 transient_def_cd 187
A.97 transient_def_cs_1atm 188
A.98 transient_def_pd 188
A.99 transient_def_p_wf_atma 189
A.100 transient_def_td 189
A.101 transient_def_t_day 190
A.102 transient_pd_radial 190
A.103 transient_pwf_radial_atma 191
A.104 unf_version 192
A.105 well_ksep_natural_d 192
A.106 well_ksep_total_d 193

Введение

Документ описывает набор макросов и функций Unifloc 7.31 VBA для проведения инженерных расчетов систем нефтедобычи в Excel. Макросы Unifloc 7.31 VBA позволяют строить расчетные модули, которые могут быть использованы для изучения математических моделей систем нефтедобычи и развития навыков проведения инженерных расчётов, изучения нефтяного инжиниринга и проведения расчетов.

Макросы и функции Unifloc 7.31 VBA охватывают основные элементы математических моделей систем «пласт - скважина - скважинное оборудование» - модель физико-химических свойств пластовых флюидов (PVT модель), модели многофазного потока в трубах, скважинном оборудовании, пласте, модели скважин и узлового анализа систем нефтедобычи.

Для использования Unifloc 7.31 VBA требуются навыки уверенного пользователя MS Excel, желательно знание основ программирования и теории добычи нефти.

Алгоритмы реализованные в Unifloc 7.31 VBA не претендуют на полноту и достоверность и ориентированы на учебные задачи и проведение простых расчётов. Руководство пользователя также не претендует на полноту описания системы (часто получается, что описание отстаёт от текущего состояния Unifloc 7.31 VBA). Все приводится как есть. Более надёжным способом получения достоверной информации о работе макросов Unifloc 7.31 VBA является изучение непосредственно расчётного кода в редакторе VBE.

https://github.com/unifloc/unifloc_vba

Хабибуллин Ринат (khabibullin.ra@gubkin.ru)

Глава 1. Макросы VBA для проведения расчётов

Расчёты Unifloc 7.31 VBA выполняются с использованием макросов, написанных на языке программирования Visual Basic for Application (VBA), встроенном в Excel [wikipedia VBA].

Макросы Unifloc 7.31 VBA могут быть использованы различными способами. В самом простом варианте для использования Unifloc 7.31 VBA не требуется программировать (писать код на VBA), достаточно уметь вызывать необходимые функции из рабочей книги Excel, создавая расчётные модули. В более сложном и мощном варианте использования на основе функций Unifloc 7.31 VBA можно создавать свои макросы, которые могут быть вызваны, например, по нажатию кнопки. Это упрощает проведение больших массовых расчётов, но требует написания кода на VBA. Самый продвинутый вариант подразумевает создание собственных программ на основе объектной модели Unifloc 7.31 VBA.

Исходный код расчётных модулей находится в отдельном файле - надстройке Excel - файле с расширением.xlam. Для использования макросов данная надстройка должна быть запущена в программе Excel при проведении расчётов. Ее можно каждый раз запускать вручную или установить для автоматического запуска при старте Excel. Подробное описание процедуры установки надстройки можно найти на сайте Microsoft по ключевым словам добавление и удаление надстроек в Excel.

1.1. Работа с VBA

1.1.1. Ручной запуск надстройки

Для работы с надстройкой рекомендуется ручной способ ее запуска, описанный в данном разделе. (альтернативный способ описан в следующем разделе). Ручной запуск надстройки не требует ее установки на компьютере. Это бывает удобно, когда версия настройки часто меняется. Для этого необходимо открыть файл надстройки непосредственно в Excel, например двойным щелчком по файлу с расширением.xlam

в проводнике. При этом Excel откроется, но никаких документов в нем не появится, а сама надстройка будет загружена и готова к использованию.

Убедиться, что надстройка загружена можно по наличию закладки ”unifloc” на панели кнопок Excel. Там же можно найти кнопку для проверки версии надстройки и исправления путей к надстройке.

При переносе файла использующего макросы Unifloc 7.31 VBA на другой компьютер, при запуске может возникать сообщение, что связанный файл надстройки не найден. Это происходит поскольку Excel при использовании функций любой надстройки автоматически при вызове функции сохраняет полный путь к надстройке. При изменении положения надстройки на компьютере (например при переносе на новый компьютер) Excel не может автоматически исправить путь и требует действий пользователя.

При получении такого сообщения возможны два варианта действий. Первый - в окне запроса следует выбрать кнопку ”изменить” и указать правильное положение файла надстройки. Второй – в окне запроса указать – продолжить (или отменить обновление связанных файлов). После того как окно закроется, на закладке ”unifloc”выбрать кнопку «исправить ссылки на надстройку». После этого для всех вызовов функций надстройки Unifloc 7.31 VBA ссылки на надстройку будут исправлены автоматически. Отчёт об исправлении можно найти в окне immediate редактора VBE.

1.1.2. Установка надстройки для автоматического запуска

1. На вкладке Файл выберите команду Параметры, а затем — категорию Надстройки.
2. В поле Управление выберите пункт Надстройки Excel, а затем нажмите кнопку Перейти. Откроется диалоговое окно Надстройки.
3. Чтобы установить и активировать надстройку Unifloc 7.31 VBA, нажмите кнопку Обзор (в диалоговом окне Надстройки), выберите файл надстройки, а затем нажмите кнопку ОК.
4. Надстройка появится в списке надстроек. Галочка активации надстройки должна быть установлена

После установки и активации надстройки, встроенными в неё макросами можно будет пользоваться в любой книге Excel на данном компьютере. При переносе расчётных файлов на другой компьютер для сохранения их работоспособности должна быть передана и установлена и надстройка. При переносе файлов использующих функции Unifloc 7.31 VBA с другого компьютера или на другой компьютер может потребоваться исправить путь к надстройке. Это можно сделать с использованием соответствующей кнопки на закладке ”unifloc”.

1.1.3. Редактор VBE

Чтобы получить доступ к макросам в текущей версии расчётного модуля для выполнения упражнений необходимо:

- Запустить Excel запустив рабочую книгу для выполнения упражнений
- Нажать комбинацию клавиш <Alt-F11>
- Откроется новое окно с редактором макросов VBA (Рис. 1.1). Иногда в литературе окно редактирования макросов обозначают как VBE (Visual Basic Enviroment)
- Окне VBE можно изучить структуру проекта (набора макросов и других элементов). Раздел со структурой проекта можно открыть из меню <Вид – Обозреватель проекта>. Макросы располагаются в ветках «модули» и «модули классов»

1.1.4. Некоторые особенности VBA

Строки, начинающиеся со знака ‘ являются комментариями. В VBE они выделяются зелёным цветом. На исполнение макросов не влияют.

Для многих макросов не обязательно задавать все параметры. Некоторые значения параметров могут не задаваться – тогда будут использованы значения параметров, принятые по умолчанию. Параметры, допускающие задание по умолчанию, помечены в исходном коде ключевым словом `Optional`.

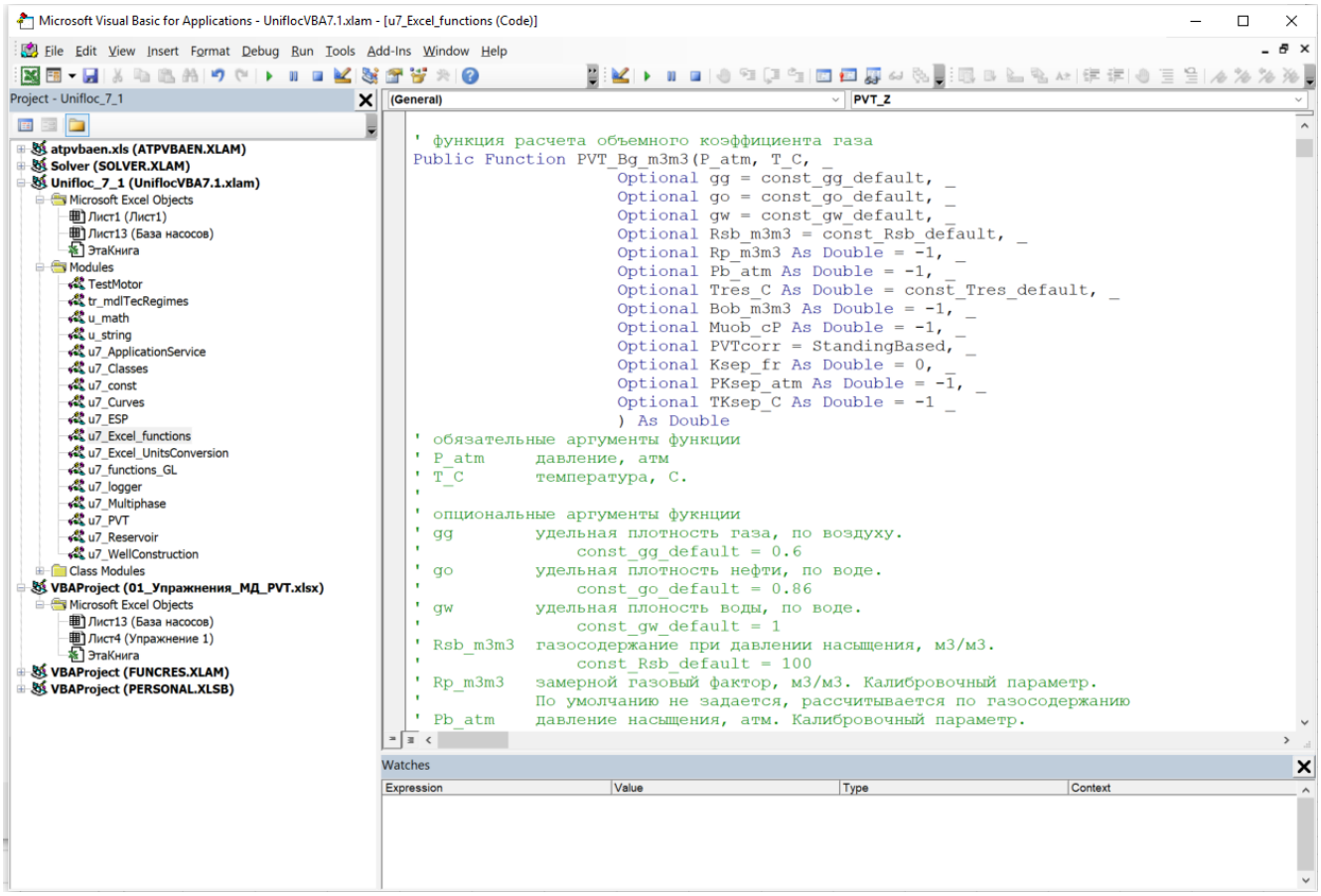


Рис. 1.1 — Окно редактора VBE

1.2. Соглашения по названию функций и переменных Unifloc 7.31 VBA

При создании макросов в основном использовались международные обозначения переменных, принятые в монографиях общества инженеров нефтяников SPE. Список наиболее употребляемых обозначений приведён в приложении.

При создании макросов для обозначения переменных разработчики старались придерживаться следующих соглашений (впрочем,не всегда успешно):

– название переменной или функции отражает физический смысл,
– лучше длинное и понятное название, чем короткое и непонятное, разделители слов в названиях - знаки подчёркивания (там, где это возможно),
– для расчётных функций название может содержать (последовательно) - префикс, указывающий группу функций, расчётное значение, ключевые параметры, на основе которых проводится расчёт, размерность результата,
– для минимизации путаницы с размерностями физических величин все размерные переменные в названии содержат явное указание размерности.

– названия единиц размерностей в переменных, данные в честь великих ученых пишутся с большой буквы (Pa, W, cP и тд, в отличии от atm, m, s)

1.3. Строковые переменные и параметры

В надстройке унифлок, начиная с версии 7.26, активно используются строковые переменные для передачи параметров и настроек расчёта различных функций. Для кодирования значений в строках используется формат json.

Работа с json строками основана на макросах github.com/VBA-tools/VBA-JSON и github.com/VBA-tools/VBA-Dictionary by Tim Hall. Макросы и информация о их разработчиках в модуле JsonConverter и модуле класса Dictionary.

Для удобства работы со строковыми переменными реализован ряд пользовательских функций для работы с ними из рабочей книги Excel. Такие функции начинаются с префикса `encode_` для функций формирующих строки json и с префикса `decode_` для функций анализирующих строки json.

Строки в формате json используются для кодирования словарей и списков (массивов) значений.

1.3.1. Строковая переменная - словарь

В словаре хранятся поименованные переменные в виде пар - ключ, значение. В VBA функциональность словаря реализуется классом Dictionary, реализованным в виде отдельного модуля. Подробнее про реализацию словарей в json можно найти в википедии или других источниках в интернете.

Словари в Unifloc 7.31 VBA используется для работы с наборами входных и выходных параметров, позволяя в одной ячейке записывать большой объем информации. Словари могут быть вложенные.

Универсальная функция для расшифровки словаря в строке json в интерфейсе excel - функция `decode_json`. Списки json обрамляются фигурными скобками {}.

1.3.2. Строковая переменная - список или массив

В списке, массиве или коллекции хранятся упорядоченные наборы переменных доступных по номеру. В VBA функциональность словаря реализуется классом Collection встроенным в объектную модель Excel. Подробнее про реализацию массивов или коллекций в json можно найти в википедии или других источниках в интернете.

Массивы в Unifloc 7.31 VBA как правило используются для хранения списков численных значений (таблично заданных функций). Используются в качестве входных значений для ряда расчетных функций и для представления результатов расчетов. Списки часто бывают встроены в словари. Универсальная функция для расшифровки словаря в строке json в интерфейсе excel - функция `decode_json`. Списки json обрамляются квадратными скобками [].

Для создания простого списка чисел равномерно распределенных на заданном интервале можно использовать функцию `encode_arange`.

1.4. Параметры расчетных пользовательских функций - param

Многие пользовательские функции Unifloc 7.31 VBA поддерживают работу с параметрами вывода и расчета закодированными в виде json строки и передаваемых через аргумент функции – `param`.

Перечень часто применяемых параметров приведен в таблице ниже.

Таблица 1 — Перечень часто применяемых параметров передаваемых через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`num_value`	Номер параметра выводимого на первом месте. Позволяет подменить выводимый параметр при `show_array=0` на необходимый. Номера можно определить по расширенному выводу при `show_array=1`
`out_points`	Количество точек для вывода кривых в результатах. По умолчанию равно 20. Применимо для расчета трубы.

При вызове пользовательских функций не поддерживаемые параметры игнорируются. Описание поддерживаемых параметров можно найти в описании функций или вычислить анализируя исходный код функций (предпочтительный вариант).

1.5. Модель пласт - скважина - скважинное оборудование

Набор функций Unifloc 7.31 VBA описывает математическую модель системы нефтедобычи, часто обозначаемой как модель ”пласт - скважина - скважинное оборудование”. Модель состоит из набора элементов - алгоритмов, описывающих ключевые физические процессы в системе нефтедобычи, существенно влияющие на результаты расчётов и на решения, которые могут быть приняты на основе расчётов.

К основным элементам системы можно отнести следующие модели:

- модель физико-химических свойств пластовых флюидов;
- модель многофазного потока в трубопроводе, элементах инфраструктуры, скважинном оборудовании (например в штуцере);
- модель многофазного потока в стволе скважины;

– модель многофазного потока в пласте и призабойной зоне скважины;
– модель работы УЭЦН, в том числе многофазного потока в УЭЦН;
– модель работы скважины как системы ”пласт - скважина - скважинное оборудование”.

Ключевым параметром модели нефтедобычи является распределение давления и температуры в системе. Моделирование всех элементов системы направлено, как правило, на то, чтобы восстановить распределение давления.

Модель нефтедобычи напрямую отражается в объектной модели Unifloc 7.31 VBA и в наборе пользовательских функций. Пользовательскими функциями называются функции VBA которые могут быть напрямую использованы из рабочих книг Excel.

Настоящее руководство пользователя описывает модель нефтедобычи и ее элементы как набор пользовательских функций, позволяющих провести расчёты из рабочей книги Excel. Более полный набор пользовательских функций и их описание можно найти в коде надстройки или в приложении ”Автоматически сгенерированное описание”.

Устройство и функциональность объектной модели Unifloc 7.31 VBA можно восстановить изучая исходный код расчётных модулей и комментарии в исходном коде. На текущий момент это наиболее надёжный, хотя и трудозатратный способ.

Глава 2. PVT - свойства флюидов и потока флюидов

2.1. Модель физико-химических свойств потока флюидов в Unifloc 7.31 VBA

В Unifloc 7.31 VBA выделяются две сущности необходимые для описания свойств добываемой продукции – флюид и поток флюидов. Флюид это статичная смесь нефти, газа и воды. Слово флюид широко используется в данном описании вместо более точного указания на состав добываемой продукции. Флюидом может называться как чистые компоненты – нефть, вода или газ, так и их смеси с произвольными соотношениями. Свойства флюидов как правило определяются в лаборатории и часто называются PVT свойства. Поток флюидов - это то, что движется в пласте, скважине, трубопроводах. Поток, в отличии от флюида, дополнительно описывается динамическими характеристиками - объёмным или массовым расходом флюида, и параметрами определяющими соотношение фаз в потоке - обводненностью и газовым фактором. Параметры потока измеряются, как правило, специальными устройствами – расходомерами. Измерения проводится непосредственно на промысле. Для обозначения флюида в коде часто используются термины fluid или PVT, для обозначения потока используется термин feed (по аналогии с обозначениями в симуляторе OLGA).

Для расчёта свойств флюидов в Unifloc 7.31 VBA используется модель нелетучей нефти (black oil model). Это простая модель, в которой предполагается наличие в нефти только двух фаз – жидкости и газа. Модель позволят рассчитать параметры флюидов, наиболее сильно влияющие на свойства потока флюидов - плотности фаз, вязкости и их объёмные соотношения в зависимости от давления и температуры.

Для всех пользовательских функций, реализующих расчёт с учётом PVT свойств необходимо задавать одинаковый набор параметров, описывающих нефть, газ и воду. Как правило это закодированные в строки (`encode_PVT()`, `encode_feed()`) параметры флюида и потока флюидов. Для некоторых функций не все параметры влияют на результат расчёта, тем не менее, они должны быть определены. Это сделано для унификации методик расчёта -– при любом вызове функции проводится расчёт всех параметров модели нелетучей нефти, но возвращаются только необходимые. Эта особенность может замедлить расчёты с использованием

пользовательских функций Excel по сравнению с функциями объектной модели Unifloc 7.31 VBA и функциями реализующими конкретные корреляции.

2.1.1. Статичные PVT параметры

Типовой набор статичных PVT параметров, описывающий флюид в достаточной для проведения расчётов степени, приведён ниже:

- γ_g - `gamma_gas` - удельная плотность газа, по воздуху. Стандартное обозначение переменной `gamma_gas`. Безразмерная величина. Следует обратить внимание, что удельная плотность газа по воздуху не совпадает с плотностью воздуха в г/см3, поскольку плотность воздуха при стандартных условиях `Const const_rho_air = 1.205` при температуре 20 °C и давлении 101325 Па для сухого воздуха. По умолчанию задается значение `const_gg_default = 0.6`
- γ_o - `gamma_oil` - удельная плотность нефти, по воде. Стандартное обозначение переменной `gamma_oil`. Безразмерная величина, но по значению совпадает с плотностью в г/см3. По умолчанию задаётся значение `const_go_default = 0.86`
- γ_w - `gamma_wat`- удельная плотность воды, по воде. Стандартное обозначение переменной `gamma_wat`. Безразмерная величина, но по значению совпадает с плотность в г/см3. По умолчанию задаётся значение `const_gw_default = 1` Плотность воды может отличаться от задаваемой по умолчанию, например для воды с большой минерализацией.
- r_{sb}- газосодержание при давлении насыщения, м3/м3. Стандартное обозначение в коде `Rsb_m3m3`. Значение по умолчанию соответствует многим месторождениям Западное Сибири `const_Rsb_default = 100`.
- P_b - давление насыщения, атм. Стандартное обозначение в коде `Pb_atm`. Калибровочный параметр. По умолчанию не задаётся, рассчитывается по корреляции. Если задан, то все расчёты по корреляциям корректируются с учётом заданного параметра. При задании давления насыщения обязательно должна быть задана температура пласта – температура при которой было определено давление насыщения.

– T_{res}- пластовая температура, °C. Стандартное обозначение в коде `Tres_C`. Учитывается при расчёте давления насыщения. По умолчанию принято значение 90 °C.
– B_{ob} - объёмный коэффициент нефти, м3/м3. Стандартное обозначение в коде `Bob_m3m3`. Калибровочный параметр. По умолчанию рассчитывается по корреляции. Если задан, то все расчёты по корреляциям корректируются с учётом заданного параметра.
– μ_{ob} - вязкость нефти при давлении насыщения, сП. Стандартное обозначение `Muob_cP`. Калибровочный параметр. По умолчанию рассчитывается по корреляции. Если задан, то все расчёты по корреляциям корректируются с учётом заданного параметра.
– PVTcorr - номер набора PVT корреляций используемых для расчёта.
    – StandingBased = 0 - на основе корреляции Стендинга
    – McCainBased = 1 - на основе корреляции Маккейна
    – StraigthLine = 2 - на основе упрощённых зависимостей

Статические параметры кодируются в json строку функцией `encode_PVT()`.

Пример закодированных параметров флюида (отформатированных с использованием переносов строк для удобства отображения в тексте руководства):

```
{"gamma_gas":0.9,
"gamma_oil":0.9,
"gamma_wat":1.1,
"rsb_m3m3":120,
"pb_atma":150,
"t_res_C":100,
"bob_m3m3":1.2,
"muob_cP":0.8,
"PVT_corr_set":1}
```

2.1.2. Динамические PVT параметры

Типовой набор динамических PVT параметров, описывающих поток флюидов в достаточной для проведения расчётов степени, приведён ниже:

– q_{liq} - дебит жидкости в стандартных условиях, м^3/сут.
– f_w - обводненность, объёмная в стандартных условиях, %.
– R_p- замерной газовый фактор, м^3/м^3. Стандартное обозначение в коде `Rp_m3m3`. Калибровочный параметр. По умолчанию используется значение равное газосодержанию при давлении насыщения. Если задаётся значение меньшее, чем газосодержание при давлении насыщения, то последнее принимается равным газовому фактору (приоритет у газового фактора, потому что как правило это замерное значение в отличии от газосодержания определяемого по результатам лабораторных исследований проб нефти).
– q_{gas} - свободный расход газа в потоке, ст. м^3/сут.

Динамические параметры кодируются в json строку функцией `encode_feed`. Данная функция кроме динамических параметров кодирует так же статические. Таким образов закодированные данные о потоке содержат все данные необходимые для расчёта элемента системы нефтедобычи.

Обратите внимание, что до версии 7.26 значение газового фактора `Rp_m3m3` относилось к PVT свойствам, что было нелогично, но так сложилось исходя из логики развития расчётных модулей. Начиная с версии 7.26 в ходе рефакторинга кода была предпринята попытка сделать код более логичным и газовый фактор отделен от статических параметров флюида.

Хороший вопрос для контроля знаний – чем отличаются параметры газовый фактор и газосодержание?

Пример закодированных параметров потока флюида (отформатированных с использованием переносов строк для удобства отображения в тексте руководства):

```
{"gamma_gas":0.9,
"gamma_oil":0.9,
"gamma_wat":1.1,
"rsb_m3m3":120,
"t_res_C":90,
"bob_m3m3":1.2,
"muob_cP":1,
"PVT_corr_set":1,
"q_liq_sm3day":15,
"fw_perc":1,
```

```
"rp_m3m3":120,
"q_gas_free_sm3day":1000}
```

2.2. Выбор набора PVT корреляций

Параметры пластовых флюидов PVT связаны между собой корреляционными зависимостями, позволяющими рассчитать часть параметров через другие. Ниже приведена схема из справочника по физическим свойствам нефти компании Юкос (2002 года) [2], показывающая последовательность расчётов PVT параметров нефти.

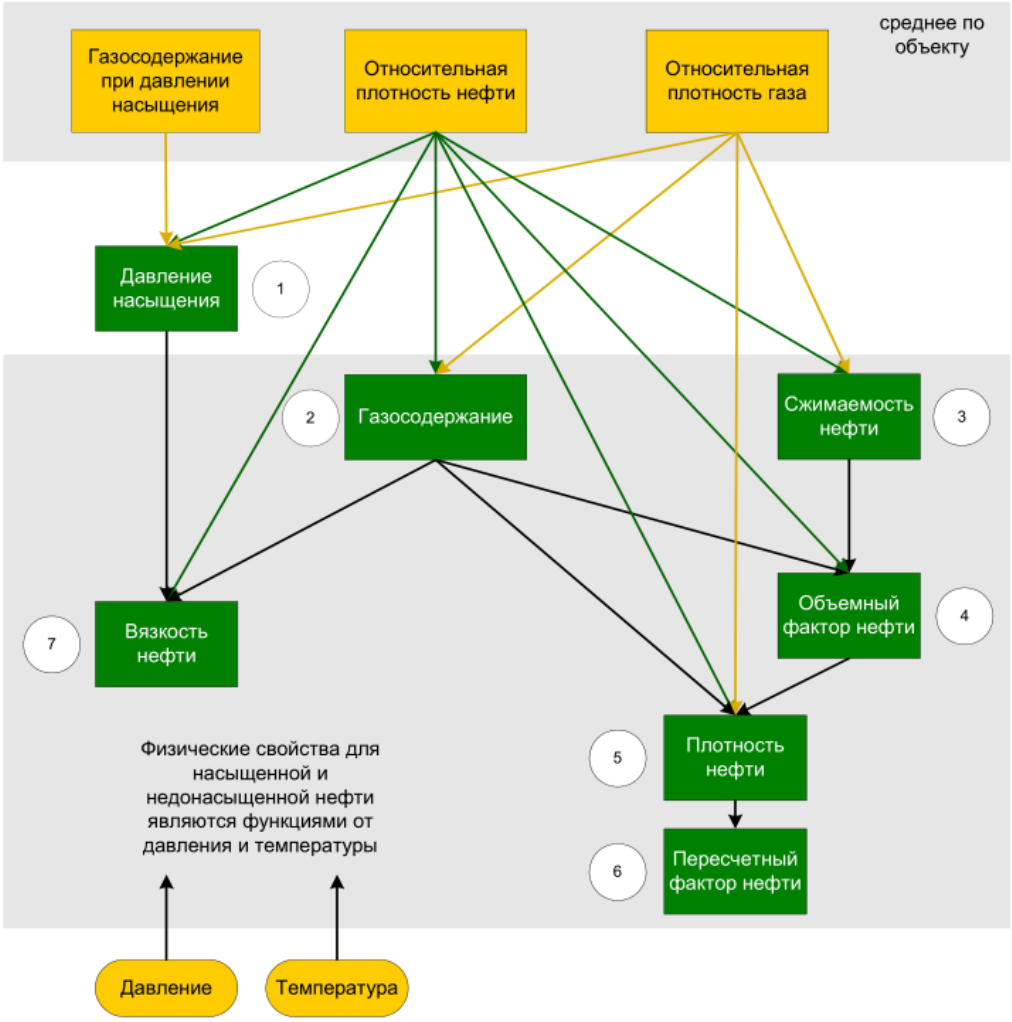


Рис. 2.1 — Схема взаимной связи PVT параметров нефти для модели black oil [2]

В Unifloc 7.31 VBA реализована возможность проведения расчётов по нескольким наборам корреляций - набору на основе корреляций Стендинга PVT_correlation=0 и на основе корреляций МакКейна

Таблица 2 — Набор корреляций на основе корреляций Стендинга `PVT_correlation=0`

Параметр	`PVT_correlation=0`
B_w	McCain 1990 [14—16]
k	Moshfeghian [17]
z	Kareem 2015 [18]
B_g	по определению через z
μ_g	Ли 1966 [19; 20]
μ_{od}	Beggs Robinson 1975 [2; 21; 22]
μ_o при $p < p_b$	Beggs Robinson 1975 [2; 21; 22]
μ_o при $p > p_b$	Vasquez Beggs 1980 [2; 23—25]
p_b	Standing 1947 [24; 26]
r_s при $p < p_b$	Standing 1947 [24; 26]
B_o при $p < p_b$	Standing 1947 [24; 26]
B_o при $p > p_b$	по определению из c_o
c_o при $p > p_b$	Vasquez Beggs 1980 [2; 23—25]
c_o при $p < p_b$	

`PVT_correlation=1`. В таблицах 2 и 3 приведены корреляции для отдельных свойств использованные в наборах. PVT корреляции позволяют восстановить все необходимые для расчётов параметры из минимального набора исходных данных - плотности газа γ_g, плотности дегазированной нефти γ_o и газосодержания при давлении насыщения r_{sb}.

Обозначение параметров в таблицах 2 и 3:

B_w – объёмный коэффициент воды, water FVF,

k – показатель адиабаты газа, gas heat capacity ratio,

z – коэффициент сверхсжимаемости газа, gas compressibility,

B_g – объёмный коэффициент газа, gas FVF,

μ_g – вязкость газа, gas viscosity,

μ_{od} – вязкость дегазированной нефти, dead oil viscosity,

μ_o – вязкость нефти при произвольном давлении, вязкость насыщенной нефти, saturated oil viscosity,

p_b – давление насыщения, bubble point pressure,

r_s – газосодержание, solution gas ratio,

B_o – объёмный коэффициент нефти, oil FVF,

Таблица 3 — Набор корреляций на основе корреляций McCain
`PVT_correlation=1`

Параметр	`PVT_correlation=1`
B_w	McCain 1990 [14], [15], [16]
k	Moshfeghian [17]
z	Kareem 2015 [18]
B_g	по определению через z
μ_g	Ли 1966 [19; 20]
μ_{od}	Beal 1946, [24; 27], Standing 1981 [2; 28]
μ_o при $p < p_b$	Beal 1946, [24; 27], Standing 1981 [28], при r_{sb}<350 м^3/м^3 Beggs Robinson 1975 [2; 21; 22], при r_{sb}>350 м^3/м^3
μ_o при $p > p_b$	Standing 1981 [28], при r_{sb}<350 м^3/м^3 Vasquez Beggs 1980 [2; 23—25], при r_{sb}>350 м^3/м^3
p_b	Valko McCain 2003 [29]
r_s при $p < p_b$	Velarde McCain 1997 [30]
B_o при $p < p_b$	McCain [16]
B_o при $p > p_b$	по определению из c_o
c_o при $p > p_b$	Vasquez Beggs 1980 [2; 23—25]
c_o при $p < p_b$	

c_o – сжимаемость нефти, oil compressibility.

Выбор корректного набора корреляций позволит более корректно описать поведение системы «пласт - скважина - скважинное оборудование».

На практике для повышения точности моделирования широко применяется задание расширенного набора исходных PVT параметров - калибровочных параметров: давления насыщения P_b, объёмного коэффициента нефти при давлении насыщения B_{ob}, вязкости нефти при давлении насыщения μ_{ob}.

Применение калибровочных параметров значительно снижает зависимость результатов расчётов от выбора корреляции, хотя и не устраняет такую зависимость полностью. Поэтому при отсутствии других соображений, рекомендуется использовать для расчётов набор на основе корреляций Стендинга (быстрее считает по сравнению с МакКейном) и применять калибровочные параметры.

Также полезно помнить, что калибровочные параметры, могут значительно искажать результаты рассчитанные по корреляциям. Например корреляция может дать давление насыщения P_b около 100 бар. Если вы введёте калибровочное значение

давления насыщения P_b 20 бар, программной ошибки в расчёте не возникнет, но в реальности расхождение давления насыщения по корреляции от фактического в 5 раз маловероятно. Скорее всего, в этом случае данные не корректны. Возможность возникновения подобных рассогласований данных следует всегда иметь в виду и применять калибровочные параметры с осторожностью.

2.3. Стандартные условия

Многие параметры нефти, газа и воды существенно зависят от давления и температуры. Например объем занимаемый определённым количеством газа примерно в два раза снизится при повышении давления в два раза.

Поэтому для удобства фиксации и сравнения параметров они часто приводятся к стандартным или нормальным условиям - определённым давлениям и температуре.

Принятые в разных дисциплинах и разных организациях точные значения давления и температуры в стандартных условиях могут различаться (смотри например https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_conditions_for_temperature_and_pressure), поэтому указание значений физических величин без уточнения условий, в которых они приводятся, может приводить к ошибкам. Наряду с термином «стандартные условия» применяется термин «нормальные условия». «Нормальные условия» обычно отличаются от «стандартных» тем, что под нормальным давлением принимается давление равное 101 325 Па = 1 атм = 760 мм рт. ст.

Обычно в монографиях SPE принято, что стандартное давление для газов, жидкостей и твёрдых тел, равное 10^5 Па (100 кПа, 1 бар); стандартная температура для газов, равная 15.6 °C соответствующая 60 °F.

В Российском ГОСТ 2939-63 принято, что стандартное давление для газов, жидкостей и твёрдых тел, равное 10.13^5 Па (101325 Па, 1 атм); стандартная температура для газов, равная 20 °C соответствующая 68 °F.

В Unifloc 7.31 VBA приняты следующие значения стандартных условий

```
Public Const const_psc_atma As Double = 1
Public Const const_tsc_C = 20
Public Const const_convert_atma_Pa = 101325
```

2.4. Кодирование PVT свойств в строке.

Свойства пластовых флюидов должны быть заданы для любого расчёта связанного с добычей нефти. Для полного задания свойств флюидов в модели Unifloc 7.31 VBA требуется указать более 10 параметров. Это не всегда бывает удобно делать, особенно если проводится расчёт с использованием нескольких функций. Необходимость контролировать большое количество входных параметров функций на расчётном листе Excel может приводить к ошибкам, опечаткам.

Для удобства в большинстве функций Unifloc 7.31 VBA создан режим упрощённого задания PVT параметров с использованием кодирования в строке. Кодирование осуществляется функциями `encode_PVT` и `encode_feed`. Результатом кодирования является строка в формате json, содержащая данные обо всех необходимых параметрах. Строку можно использовать в качестве аргумента в расчётах требующих указания PVT свойств.

```
' Функция кодирования параметров PVT в строку,
' для передачи PVT свойств в прикладные функции Унифлок.
Public Function encode_PVT( _
                    Optional ByVal gamma_gas As Double = const_gg_, _
                    Optional ByVal gamma_oil As Double = const_go_, _
                    Optional ByVal gamma_wat As Double = const_gw_, _
                    Optional ByVal rsb_m3m3 = const_rsb_default, _
                    Optional ByVal pb_atma, _
                    Optional ByVal t_res_C, _
                    Optional ByVal bob_m3m3, _
                    Optional ByVal muob_cP, _
                    Optional ByVal PVT_corr_set _
                    )
' gamma_gas - удельная плотность газа, по воздуху.
'              По умолчанию const_gg_ = 0.6
' gamma_oil - удельная плотность нефти, по воде.
'              По умолчанию const_go_ = 0.86
' gamma_wat - удельная плотность воды, по воде.
'              По умолчанию const_gw_ = 1
' rsb_m3m3  - газосодержание при давлении насыщения, м3/м3.
'              По умолчанию const_rsb_default = 100
' rp_m3m3 - замерной газовый фактор, м3/м3.
'            Имеет приоритет перед rsb если rp < rsb
```

```
' pb_atma - давление насыщения при  температуре t_res_C, атма.
'           Опциональный калибровочный параметр,
'           если не задан или = 0, то рассчитается по корреляции.
' t_res_C  - пластовая температура, C.
'           Учитывается при расчете давления насыщения.
'           По умолчанию  const_tres_default = 90
' bob_m3m3 - объемный коэффициент нефти при давлении насыщения
'            и пластовой температуре, м3/м3.
'            По умолчанию рассчитывается по корреляции.
' muob_cP  - вязкость нефти при давлении насыщения.
'            и пластовой температуре, сП.
'            По умолчанию рассчитывается по корреляции.
' PVT_corr_set - номер набора PVT корреляций для расчета:
'           0 - на основе корреляции Стендинга;
'           1 - на основе кор-ии Маккейна;
'           2 - на основе упрощенных зависимостей.
' результат - закодированная строка
```

Все доступные параметры флюида (по состоянию для версии 7.26) перечислены в таблице ниже

Параметр	Описание	Примечание
gamma_gas	удельная плотность газа	обязательный
gamma_oil	удельная плотность нефти	обязательный
gamma_wat	удельная плотность воды	опциональный
rsb_m3m3	газосодержание при давлении насыщения	обязательный
pb_atma	давление насыщения	калибровочный
t_res_C	пластовая температура	калибровочный
bob_m3m3	объёмный коэффициент нефти при давлении насыщения	калибровочный
muob_cP	вязкость нефти при давлении насыщения	калибровочный
PVT_corr_set	номер набора корреляционных зависимостей	опциональный

Калибровочные параметры опциональны - если их не задать, соответствующие значения будут рассчитаны по корреляциям.

```
'Функция кодирования параметров потока флюидов в строку,
Public Function encode_feed( _
          Optional ByVal q_liq_sm3day As Double = 10, _
          Optional ByVal fw_perc As Double = -1, _
          Optional ByVal rp_m3m3 As Double = -1, _
          Optional ByVal q_gas_free_sm3day As Double = -1, _
          Optional ByVal fluid As String = PVT_DEFAULT)
' q_liq_sm3day  - дебит жидкости в ст.условиях.
' fw_perc       - ободненность, %
' rp_m3m3       - газовый фактор, м3/м3:
' q_gas_free_sm3day - расход свободного газа, ст. м3/сут
'
' результат - закодированная строка
```

Все доступные параметры потока флюидов (по состоянию для версии 7.26) перечислены в таблице ниже

Параметр	Описание	Примечание
q_liq_sm3day	дебит жидкости	обязательный
fw_perc	обводненность	обязательный
rp_m3m3	газовый фактор	опциональный
q_gas_free_sm3day	дебит свободного газа	опциональный

Декодировать строку PVT или строку параметров потока можно с использованием универсальной функции decode_json. Результатом работы функции декодирования является таблица закодированных параметров и их значений (при выводе в эксель необходимо использовать вывод массива значений, для старых версий excel использовать комбинацию клавиш Cntrl-Shift-Enter).

```
' Функция декодирования json строки,
' позволяет вывести содержимое json строки в таблицу
Public Function decode_json(json, _
                          Optional transpose As Boolean = False, _
                          Optional keys_filter, _
                          Optional only_values As Boolean = False, _
                          Optional safe_out As Boolean = False)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' transpose - выбор вывода в строки или в столбцы
' keys_filter - строка с ключами, которые надо вывести
' only_values - если = 1 подписи выводиться не будут
```

```
' safe_out - флаг заставляет выводить массив сторок,
'            что может работать лучше в офисе 2016 и ранее
' результат - закодированная строка
```

`u7_Excel_functions_service` - модуль в котором можно найти функции кодирования.

2.5. Преобразования потоков флюидов

При движения потока флюидов в системе нефтедобычи он может изменяться за счёт смешения различных потоков или разделения одного потока на несколько.

Простые преобразования потоков могут быть рассчитаны с использованием пользовательских функций Unifloc 7.31 VBA начинающихся с префикса `feed_mod_` – feed modification functions.

- сепарация части свободного газа из потока
- смешение двух потоков
- разделение потока флюидов с произвольными параметрами

2.5.1. feed_mod_separate_gas – сепарация части свободного газа из потока

Функция `feed_mod_separate_gas` описывает процесс сепарации свободного газа из потока, например на приёме УЭЦН или в газосепараторе. После отделения части свободного газа из потока, свойства потока по прежнему могут быть описаны в рамках модели нелетучей нефти, но с несколько модифицированными параметрами, учитывающими изменение фазового состава. Функция `feed_mod_separate_gas` как раз рассчитывает такие параметры.

Алгоритм модификации параметров потока сводится к снижению газового фактора и расхода свободного газа, что удаляет газ из потока. При необходимости проводится корректировка давления насыщения P_b, объёмного коэффициента при давлении насыщения B_{ob} и вязкости при давлении насыщения μ_{ob}.

Как правило, сепарация газа из потока проводится при относительно низком давлении, например при давлении на приёме насоса. Для потока в трубах предполагается, что в каждый момент времени все фазы потока находятся в термодинамическом равновесии, что позволяет применять корреляции для нелетучей нефти. Однако при поступлении частично дегазированного потока в насос, давление в нем резко повышается на значительную величину (для центробежного насоса с производительностью 150 м^3/сут, время прохождения потоком через одну ступень составляет около 0.02 сек [31], таким образом через ЭЦН с 400 ступеней поток будет двигаться порядка 10 сек. При этом давление может повыситься на величину порядка 200 атм). За такое время свободный газ оставшийся в потоке может не успеть достичь термодинамического равновесия с нефтью, или другими слова может не успеть полностью раствориться. В работе Игревского В.И. [31] для учёта этого эффекта вводится коэффициент фазной неравновесности K_f

$$K_f = \frac{V_{sol}}{V_{eq}} = \frac{Q_{g.sol}}{Q_{g.eq}}$$

где V_{sol} - объем газа который растворится в нефти при движении через ЭЦН, V_{sol} - объем газа который растворился бы в нефти при движении через ЭЦН при достижении термодинамического равновесия.

Величина K_f зависит среди прочих параметров от дисперсности потока (размера пузырьков газа), и объёмного газосодержания. Для грубодисперсных смесей газ - вода можно принять $K_f = 0.2$, для тонкодисперсных от $K_f = 0.7$ до $K_f = 1$. Для газонефтяных смесей можно считать $K_f = 1$, то есть весь газ успевает раствориться в нефти при движении через ЭЦН. Это же предположении может быть использовано при движении газонефтяной смеси через трубы (скорость движения меньше в 5 - 10 раз в НКТ по сравнению с ЭЦН).

Для оценки влияния фазной неравновесности нефти на параметры многофазного потока при сепарации газа из потока можно использовать параметр `gas_goes_into_solution`, который определяет значение K_f

При условии $K_f = 0$ – газ выделившийся в свободное состояние не растворяется обратно в нефти, при $K_f = 1$ – весь газ может раствориться при повышении давления.

Новый газовый фактор и расход свободного газа, после сепарации газа можно найти из условия

$$r_p^{new} = r_p - (r_p - r_s)\, k_{sep} \tag{2.1}$$

$$q_{gas}^{new} = q_{gas}(1 - k_{sep}) \tag{2.2}$$

Максимально возможное значение газосодержания при повышении давления можно найти из выражения

$$r_s^{max} = r_s + (r_p - r_s)\,(1 - k_{sep}) * K_f \tag{2.3}$$

При повышении давления часть газа может растворяться в нефти, что можно описать найдя величины P_b^{new}, B_{ob}^{new},μ_{ob}^{new} с учетом максимально достижимого значения газосодержания (2.3).

$$P_b^{new} = P_b(r_s^{max})$$

$$B_{ob}^{new} = B_{ob}(r_s^{max})$$

$$\mu_{ob}^{new} = \mu_{ob}(r_s^{max})$$

где соответствующие зависимости $P_b(r_s)$, $B_o(r_s)$,$\mu_o(r_s)$ определяются в соответствии с заданным набором корреляций.

Рассмотрим пример 1 преобразования свойств потока флюида для следующего набора параметров: параметры сепарации: $k_{sep} = 0.5$,$p_{sep} = 50$ атма, $t_{sep} = 90$ C ,$K_f = 0$.

Зависимости свойств флюида от давления для примера 1 приведены на рисунке 2.2.

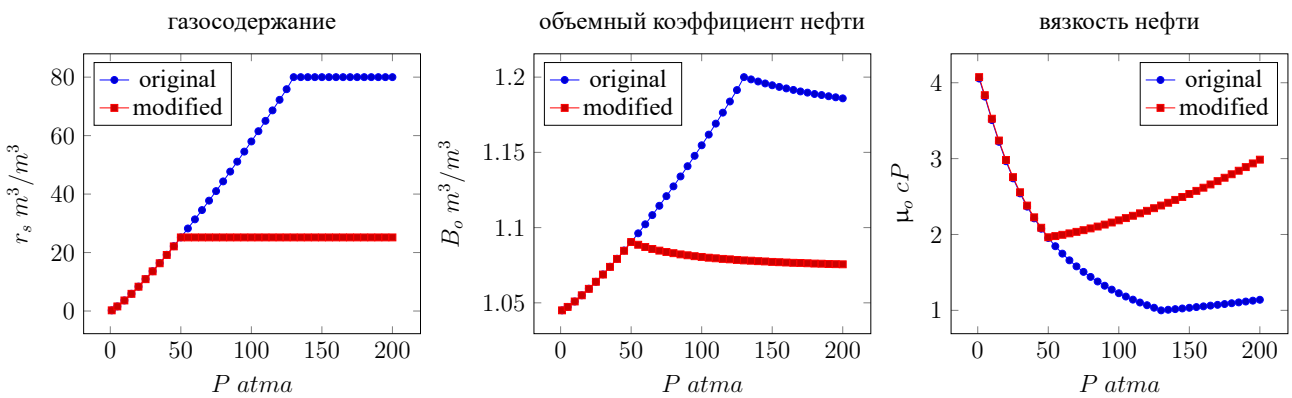


Рис. 2.2 — Зависимость параметров флюида от давления до и после сепарации части свободного газа. Пример 1, $K_f = 0$ – газ не растворяется при повышении давления

Из приведённых рисунков видно, что свойства нефти при давлении ниже давления сепарации не изменились, а новое давление насыщения показывает, что

Таблица 4 — Исходные данные и результаты расчёта модификации флюида после частичной сепарации свободного газа. Пример 1, $K_f = 0$ – газ не растворяется при повышении давления.

Параметр	Исходные значения	Модифицированные
γ_g	0.9	0.9
γ_o	0.9	0.9
r_{sb} , м^3/м^3	80	25
P_b , атма	130	50
T_{res}, С	90	90
B_{ob} , м^3/м^3	1.2	1.09
μ_{ob}, сП	1	1.96
$Q_{gas\ free}$, м^3/сут	1000	500
Q_{liq}, м^3/сут	15	15
f_w, %	1	1
r_p, м^3/м^3	80	52

при повышении давления газ не будет растворяться в нефти. При этом значения параметров потока жидкости Q_{liq}, f_w не изменяются.

При увеличении коэффициента неравновесности $K_f = 0.9$ картина изменится - эффективное значение давления насыщения нефти вырастет, что позволит части газа раствориться. Ниже приводится пример 2, где также для наглядности изменён набор корреляций для следующего набора параметров: $k_{sep} = 0.5$,$p_{sep} = 50$ атма, $t_{sep} = 90$ С ,$K_f = 0.9$. Результаты расчета приведены в таблице 5 и на рисунке 2.3.

Следует отметить, что на величину эффективного значения давления насыщения может значительно влиять выбор набора корреляций для расчёта PVT свойств, в частности корреляции для зависимости давления насыщения от газосодержания при давлении насыщения.

Таблица 5 — Исходные данные и результаты расчёта модификации флюида после частичной сепарации свободного газа. Пример 2, $K_f = 0.9$ – газ частично растворяется при повышении давления.

Параметр	Исходные значения	Модифицированные
γ_g	0.9	0.9
γ_o	0.9	0.9
r_{sb} , м^3/м^3	80	61
P_b , атма	130	84
T_{res}, С	90	90
B_{ob} , м^3/м^3	1.2	1.16
μ_{ob}, сП	1	1.22
$Q_{gas\ free}$, м^3/сут	1000	500
Q_{liq}, м^3/сут	15	15
f_w, %	1	1
r_p, м^3/м^3	80	63

Зависимости свойств флюида от давления для примера 2 приведены на рисунке 2.3.

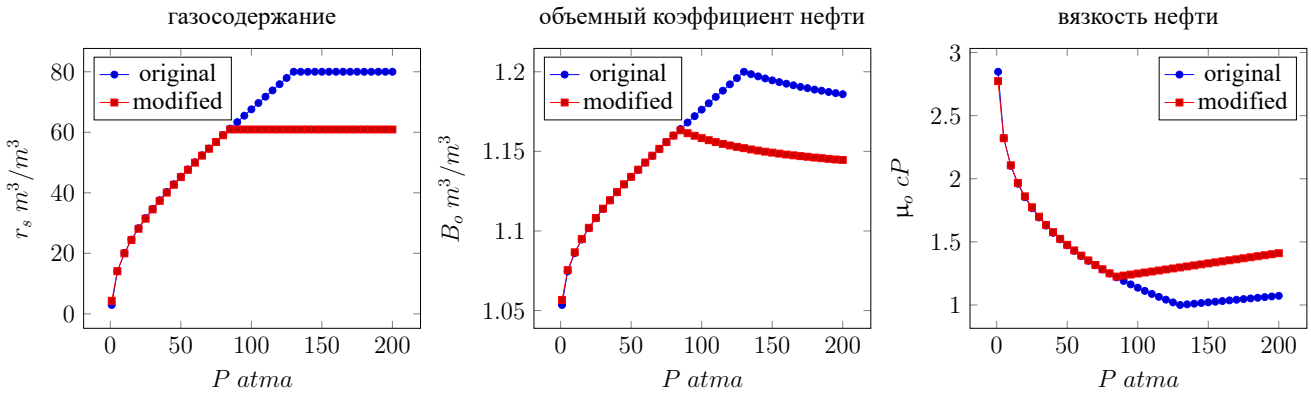


Рис. 2.3 — Зависимость параметров флюида от давления до и после сепарации части свободного газа. Пример 2, $K_f = 0.9$ – газ частично растворяется при повышении давления

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 6 — Параметры функции `feed_mod_separate_gas` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`gas_goes_into_solution`	Коэффициент фазной неравновесности K_f

При включенной опции `show_array=1` результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода результата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу протягиванием на несколько строк.

Таблица 7 — Расширенный вывод функции `feed_mod_separate_gas`

№	Параметр	Описание
0	`feed`	json строка описывающая параметры модифицированного потока флюидов
1	`log`	Лог расчета, выводится при `show_log = 1`

Функция `feed_mod_separate_gas` поддерживает передачу параметров сепарации, давления, температуры и свойств потока в виде списка значений. Список должен быть json строкой кодирующей список. Числовые параметры – давление, температура, коэффициент сепарации могут быть закодированы функцией `encode_arange` или являться результатами расчетов других функций. Список потоков может быть закодирован функцией `encode_feed_list`. Расчет списка

включается если хотя бы один из параметров передан в виде списка. В таком случае остальные параметры меняться не будут. Результаты расчета выводятся в виде словаря результатов, содержащего исходные списки с которыми проводился расчет и список модифицированных свойств флюида.

Таблица 8 — Вывод функции `feed_mod_separate_gas` при расчете по списку значений

№	Ключ	Описание значения
1	`p_atma`	список значений давления использованных для расчета
2	`t_C`	список значений температуры использованных для расчета
3	`k_sep`	список значений коэффициента сепарации использованных для расчета
4	`feed`	список параметров потока - результат расчета для соответствующих давлений, температуры и коэффициента сепарации

Для извлечения результатов расчета из словаря можно использовать функцию `decode_json`. Для упрощенного извлечения отдельных списков подходят соответствующие функции: `decode_json_p_atma`, `decode_json_t_C`, `decode_json_q_liq_sm3day`.

2.5.2. feed_mod_split – разделение двух потоков флюидов

Тут надо будет описать функцию расчёта параметров двух разделённых потоков флюидов с произвольными коэффициентами деления по фазам. Пока не реализовано

2.5.3. feed_mod_mix – смешивание двух потоков флюидов

Тут надо будет описать функцию расчёта параметров двух смешанных потоков флюидов. Пока не реализовано

2.6. Соотношение некоторых свойств пластовых флюидов

Приведем в этом разделе несколько картинок, рассчитанных с использованием Unifloc 7.31 VBA показывающих соотношение некоторых параметров для различных типов флюидов. Расчет проведен с использованием `ex010.PVT.xlsm` и его можно повторить. Картинки представляются интересными и полезными, но не вписываются в описание отдельных функций, поэтому приводятся тут. Интересное наблюдение по этим графикам - это то, что свойства газа сильно отличаются от свойств жидкости. При этом свойства газа сильно меняются с давлением.

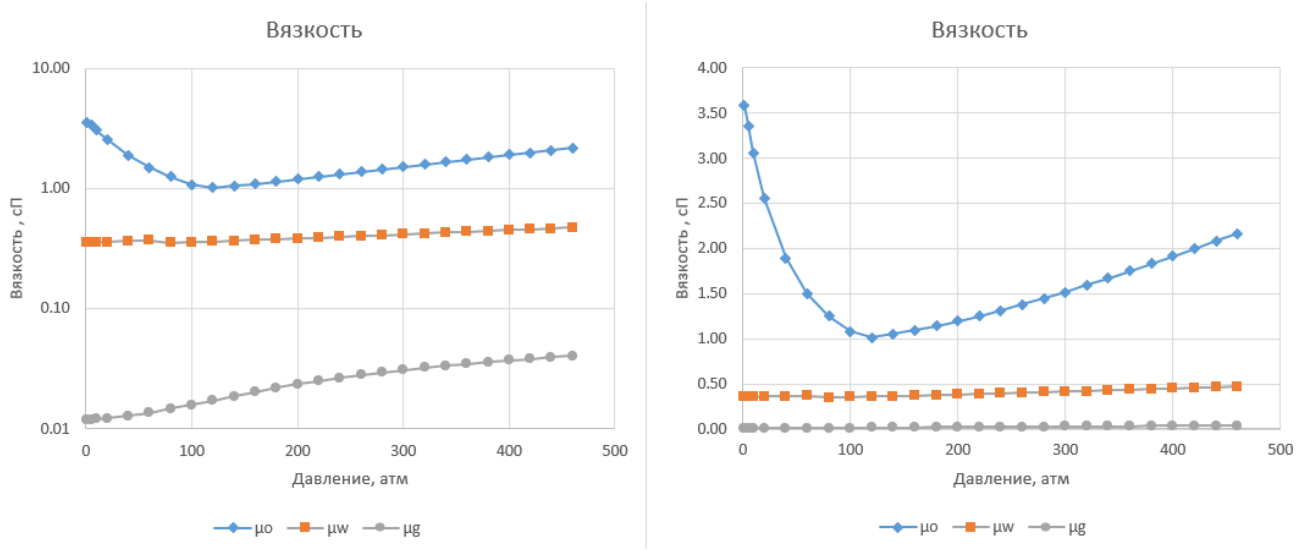


Рис. 2.4 — Зависимость вязкости от давления для нефти, газа и воды. Обычные и полулогарифмические координаты

Вязкость газа сильно меньше чем для нефти и воды, поэтому ее логично показать в полулогарифмических координатах. Также заметно для нефти, что давление насыщения сильно влияет.

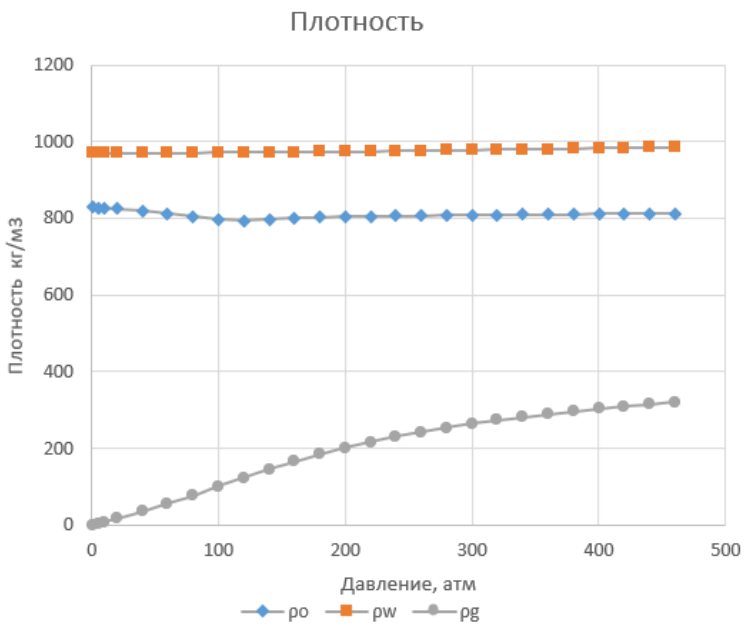


Рис. 2.5 — Зависимость плотности от давления для нефти, газа и воды

Плотность газа сильно растет с давлением, но при этом в диапазоне интереса остается заметно ниже плотности нефти и воды.

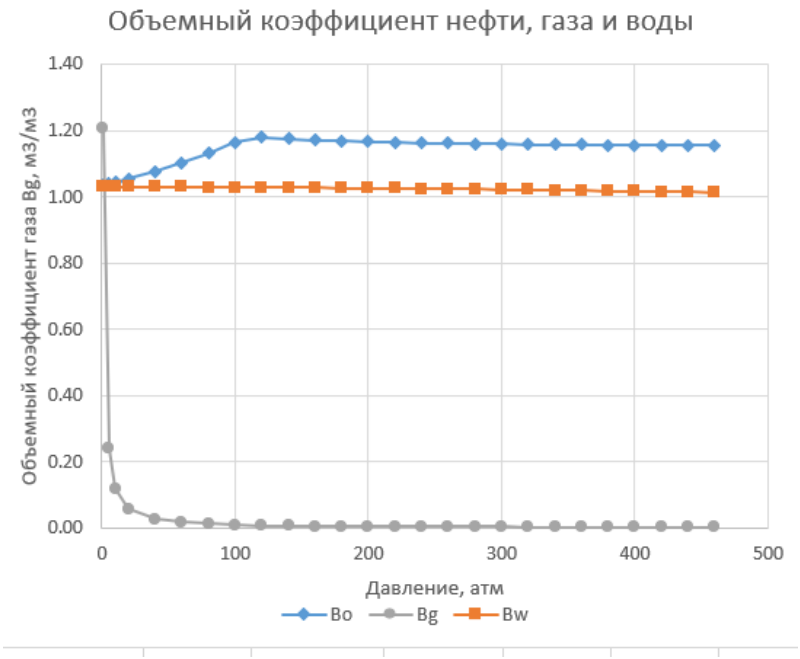


Рис. 2.6 — Зависимость объемного коэффициента от давления для нефти, газа и воды

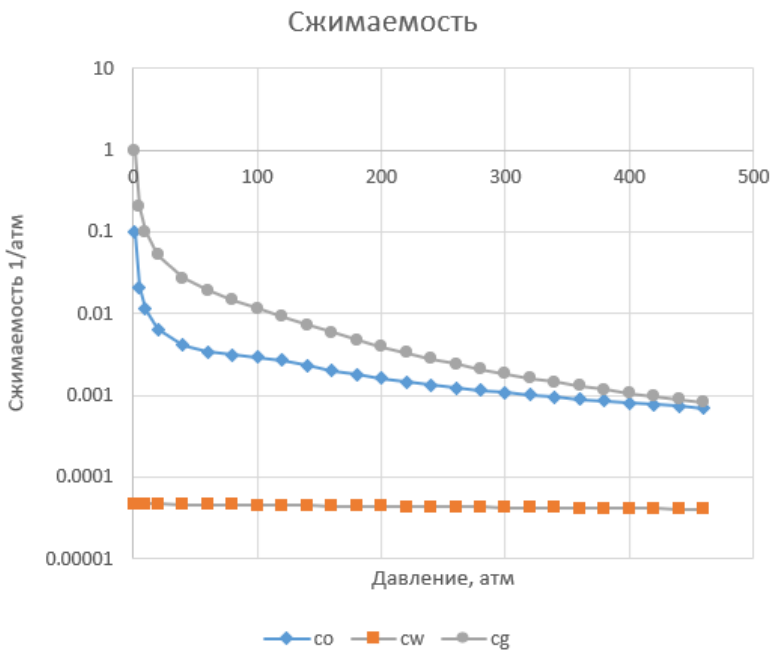


Рис. 2.7 — Зависимость сжимаемости от давления для нефти, газа и воды

Объемный коэффициент и сжимаемость непосредственно связаны между собой. Для нефти это справедливо только для насыщенной нефти.

$$B = B_{ref} e^{c(p - p_{ref})}$$

Для газа сжимаемость зависит от z фактора

$$c_g = \frac{1}{p} - \frac{1}{z}\frac{dz}{dp}$$

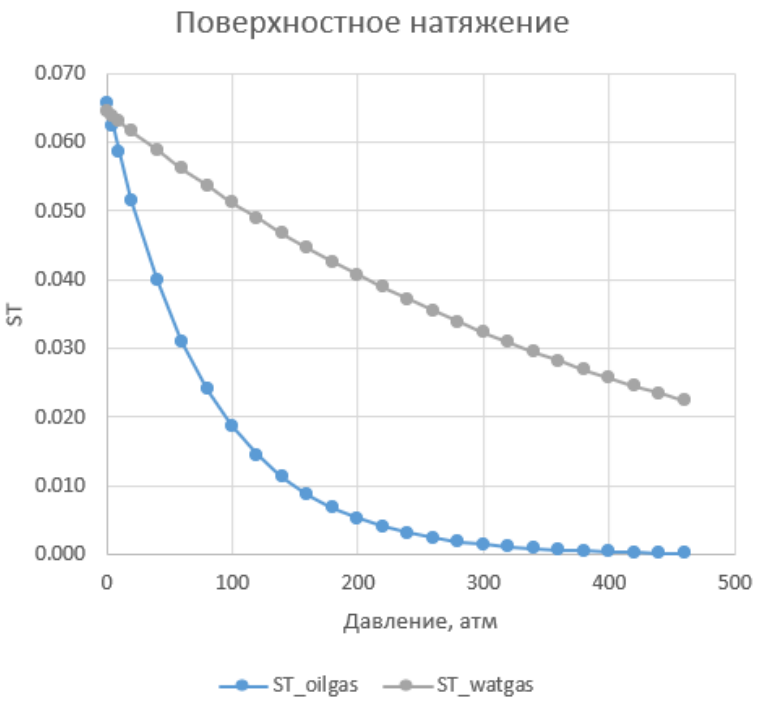


Рис. 2.8 — Зависимость коэффициента поверхностного натяжения нефть-газ и вода-газ от давления

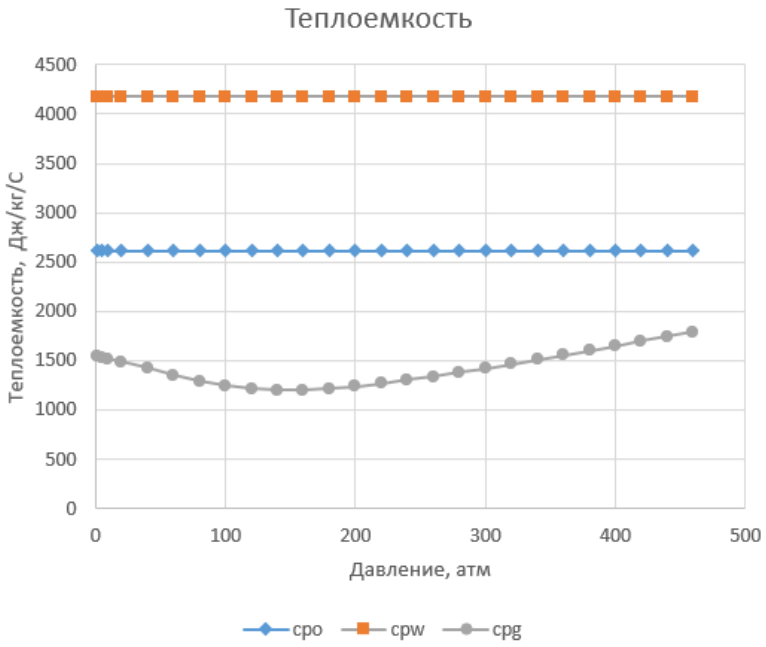


Рис. 2.9 — Зависимость теплоемкости при постоянном давлении от давления

2.6.1. PVT_pb_atma давление насыщения

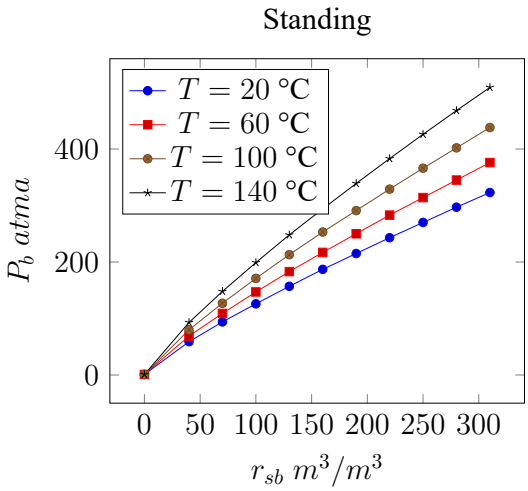
Функция рассчитывает давление насыщения по известным данным газосодержания при давлении насыщения, γ_g, γ_o, T_r.

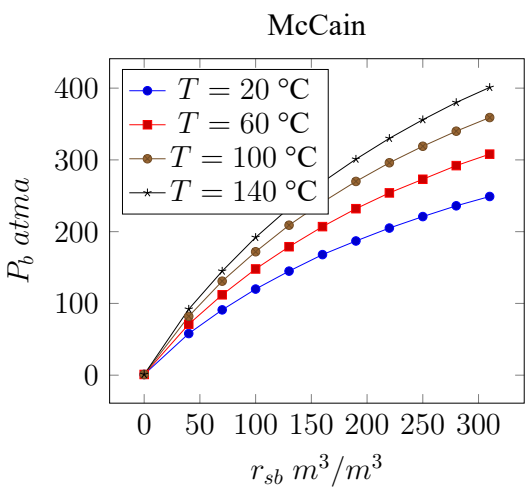
При проведении расчётов с использованием значения давления насыщения, следует помнить, что давление насыщения является функцией температуры. В частности при калибровки результатов расчётов на известное значение давления насыщения P_b следует указывать значение пластовой температуры T_r при котором давление насыщения было получено.

В наборе корреляций на основе корреляции Стендинга расчет давления насыщения проводится по корреляции Стендинга [2]

```
' Расчет давления насыщения
Public Function PVT_pb_atma( _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число - давление насыщения.
```

Пример расчёта с использованием функции `PVT_pb_atma` для различных наборов PVT корреляций приведён на рисунке ниже. Видно, что результаты расчетов по различным корреляциях дают качественно схожие результаты, но не совпадают друг с другом. Отличия, по всей видимости, обусловленные применением различных наборов исходных данных, использовавшихся авторами. Поэтому при проведении расчетов для конкретного месторождения актуальной является задача выбора адекватного набора корреляций. Макросы Unifloc 7.31 VBA позволяют провести расчет с использованием различных подходов, но при этом выбор корреляции остается за пользователем.





При проведении расчётов с использованием набора корреляций на основе корреляций МакКейна следует учитывать, что они работают только для температур более 18 °C. При более низких значениях температуры расчёт будет проводиться для 18 °C.

Обратите внимание, что для функции `PVT_pb_atma` набор аргументов отличается от набора для всех остальных функций PVT. Для расчёта давления насыщения нет необходимости задавать давление при котором будет проведён расчёт, так как давление является результатом расчёта.

2.6.2. PVT_rs_m3m3 – газосодержание

Газосодержание это отношения объёма газа растворённого в нефти приведённого к стандартным условиям к объёму дегазированной нефти приведённой к стандартным условиям.

$$r_s = \frac{V_{g,sc}}{V_{o,sc}}$$

Газосодержание является одним из ключевых свойств нефти при расчётах производительности скважин и работы скважинного оборудования. Динамика изменения газосодержания при изменении давления и температуры во многом определяет количество свободного газа в потоке и должна учитываться при проведении расчётов.

При задании PVT свойств нефти часто используют значение газосодержания при давлении насыщения r_{sb} - определяющее объем газа растворенного в нефти в пластовых условиях. В модели флюида Unifloc 7.31 VBA газосодержание

при давлении насыщения является исходным параметром нефти и должно быть обязательно задано.

Следует отличать газосодержание в нефти при давлении насыщения r_{sb} и газовый фактор r_p.

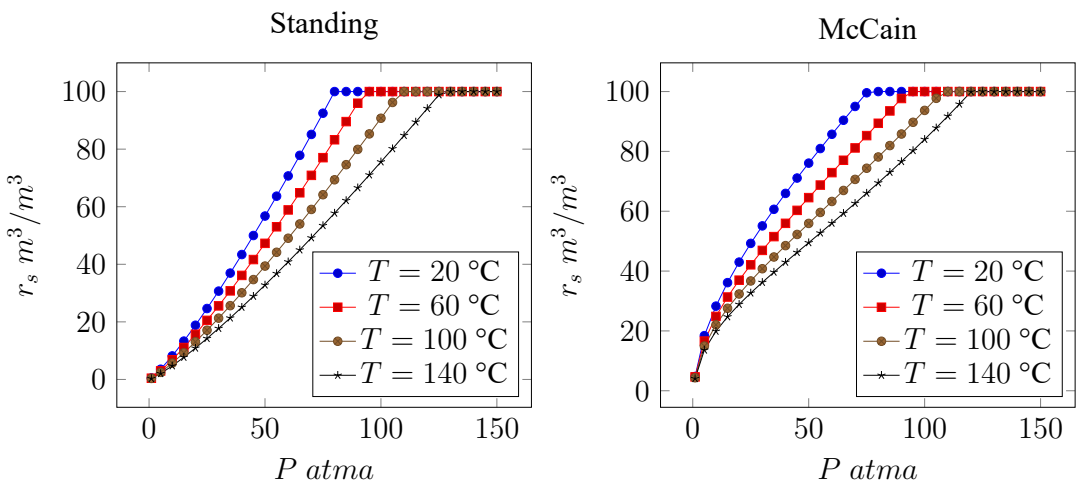
$$r_p = \frac{Q_{g,sc}}{Q_{o,sc}}$$

Газовый фактор r_p в отличии от газосодержания r_{sb} является, вообще говоря, параметром скважины - показывает отношение объёма добытого из скважины газа к объёму добытой нефти приведённые к стандартным условиям. Газосодержание же является свойством нефти - показывает сколько газа растворено в нефти. Если газ добываемый из скважины это газ который выделился из нефти в процессе подъёма, что характерно для недонасыщенных нефтей, то значения газового фактора и газосодержания будут совпадать. Если газ поступает в скважину не непосредственно из добываемой нефти, а например фильтруется из газовой шапки или поступает через негерметичность ствола скважины - то в такой скважине газовый фактор может значительно превышать значение газосодержания. Такая ситуация может быть смоделирована в Unifloc 7.31 VBA. Для этого необходимо наряду с газосодержанием при давлении насыщения r_{sb} задать значение газового фактора r_p. В этом случае газосодержание при давлении насыщения r_{sb} будет определять динамику выделения попутного газа из нефти при снижении давления, а газовый фактор R_p определять общее количество газа в потоке.

При определённых условиях газовый фактор может быть меньше газосодержания. Это происходит, когда газ выделяется в призабойной зоне и скапливается в ней, не поступая в скважину вместе с нефтью. При этом в скважину поступает частично дегазированная нефть. Такие условия возникают редко, требуют определённого набора параметров, существуют на скважине ограниченное время и представляют интерес больше для разработчиков нежели чем для технологов. С точки зрения анализа работы скважины и скважинного оборудования можно считать, что значение газового фактора не может быть меньше газосодержания при давлении насыщения. Такой предположение реализовано в Unifloc 7.31 VBA. При этом значение газового фактора технически легче измерить чем газосодержание - поэтому при противоречии значений газового фактора и газосодержания при давлении насыщения приоритет отдается газовому фактору.

```
' расчет газосодержания
Public Function PVT_rs_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение газосодержания, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
```

Примеры расчёта с использованием функции `PVT_Rs_m3m3` для различных наборов PVT корреляций приведён на рисунке ниже.



2.6.3. PVT_bo_m3m3 – объёмный коэффициент нефти

Функция рассчитывает объёмный коэффициент нефти для произвольных термобарических условий. Объёмный коэффициент нефти определяется как отношение объёма занимаемого нефтью в пластовых условиях к объёму занимаемому нефтью при стандартных условиях.

$$B_o = \frac{V_{o,rc}}{V_{o,sc}}$$

Нефть в пласте занимает больший объем, чем на поверхности, за счёт растворенного в ней газа. Соответственно объёмный коэффициент нефти обычно имеет значение больше единицы при давлениях больше чем стандартное.

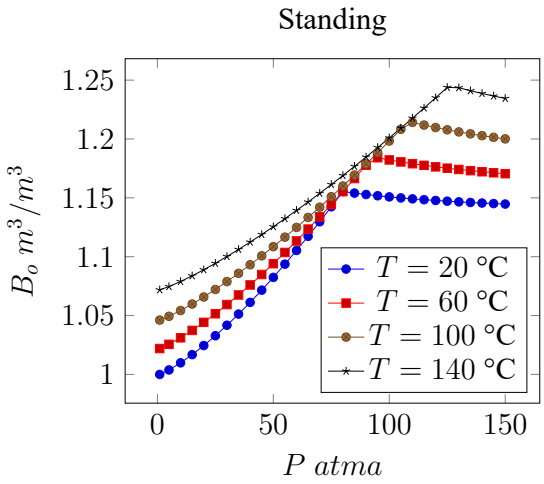
Для калибровки значения объёмного коэффициента можно использовать значение объёмного коэффициента нефти при давлении насыщения B_{ob}.

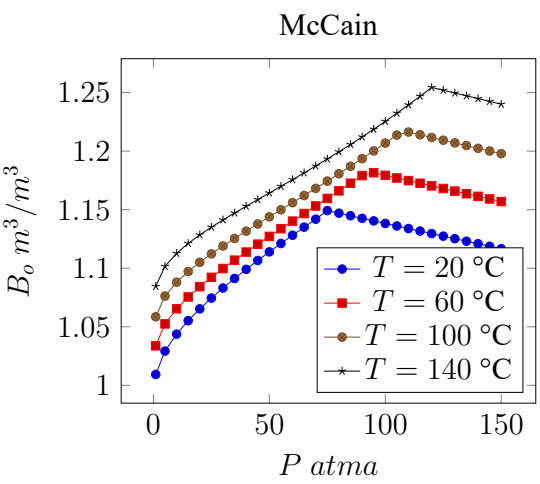
Следует отметить, что вообще говоря значение объёмного коэффициента нефти при давлении насыщения не является значением при пластовых условиях (при давлении выше давления насыщения играет роль сжимаемость нефти), однако при анализе производительности скважины и скважинного оборудования можно условно считать, что значение объёмного коэффициента при давлении насыщения соответствует значению объёмного коэффициента в пластовых условиях.

```
' расчет объемного коэффициента нефти
Public Function PVT_bo_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение объемного коэффициента нефти, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
```

Примеры расчёта с использованием функции `PVT_bo_m3m3` для различных наборов PVT корреляций приведены на рисунках ниже.

Объёмный коэффициент нефти хорошо коррелирует со значением газосодержания. Поэтому различный вид кривых на рисунке ниже связан с первую очередь с различным газосодержанием при проведении расчётов.





2.6.4. PVT_bg_m3m3 – объёмный коэффициент газа

Функция рассчитывает объёмный коэффициент нефтяного газа для произвольных термобарических условий.

Объёмный коэффициент газа определяется как отношение объёма, занимаемого газом для произвольных термобарических условий (при определённом давлении и температуре), к объёму, занимаемому газом при стандартных условиях.

$$B_g = \frac{V_{g,rc}(P,T)}{V_{g,sc}}$$

Значение объёмного коэффициента газа может быть определено исходя из уравнения состояния газа

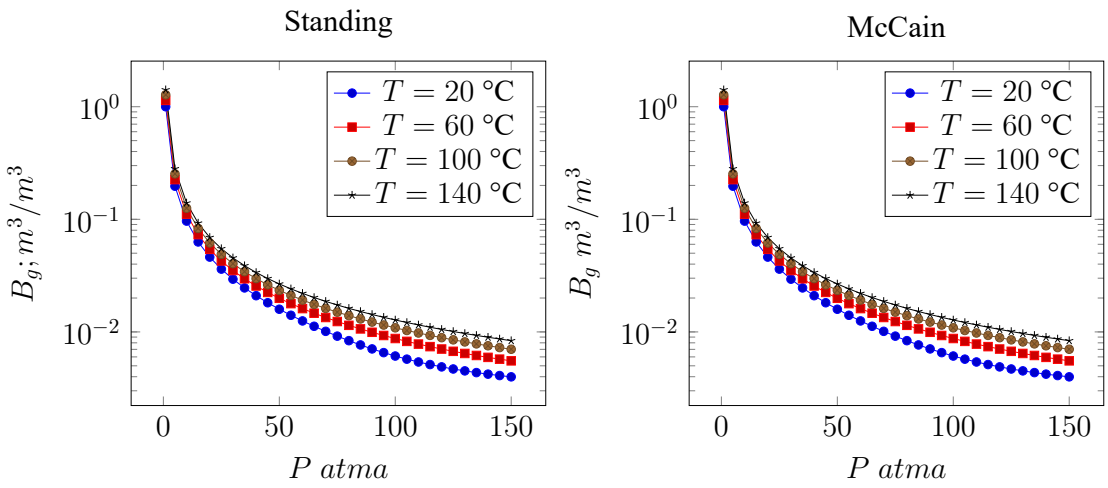
$$PV = z\nu RT$$

откуда можно получить

$$B_g = z\frac{P_{sc}}{P}\frac{T}{T_{sc}}$$

где P_{sc}, T_{sc} давление (атм) и температура (К) при стандартных условиях, P,T давление (атм) и температура (°К) при расчетных условиях, z коэффициент сверхсжимаемости газа, который вообще говоря зависит от давления и температуры $z = z(P,T)$.

```
' функция расчета объемного коэффициента газа
Public Function PVT_bg_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение объемного коэффициента газа, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
' В основе расчета корреляция для z факотора
```



2.6.5. PVT_bw_m3m3 – объёмный коэффициент воды

Функция рассчитывает объёмный коэффициент воды для произвольных термобарических условий.

Объёмный коэффициент воды определяется как отношение объёма занимаемого водой для произвольных термобарических условий (при определённом давлении и температуре) к объёму, занимаемому водой при стандартных условиях.

$$B_w = \frac{V_{w,rc}(P,T)}{V_{w,sc}}$$

```
' расчет объемного коэффициента воды
Public Function PVT_bw_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение объемного коэффициента воды, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
```

2.6.6. PVT_mu_oil_cP – вязкость нефти

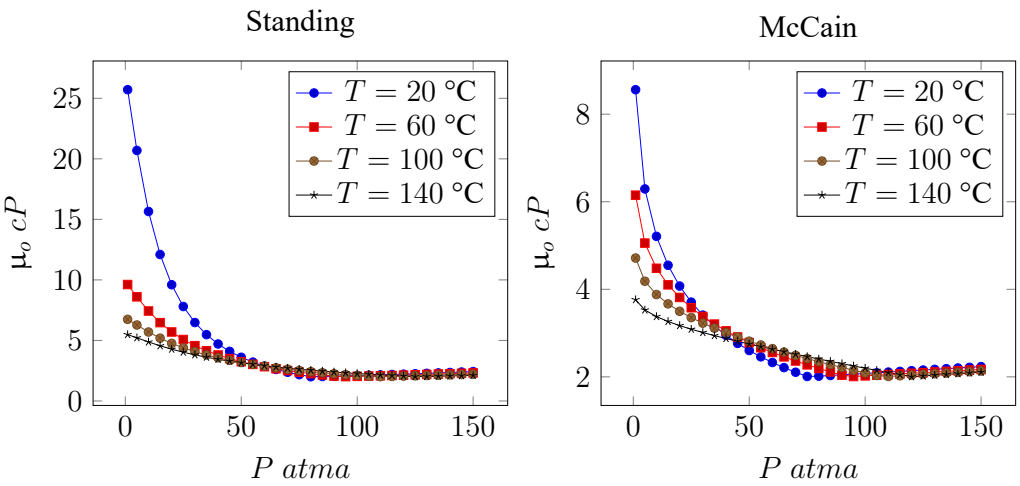
Функция рассчитывает вязкость нефти при заданных термобарических условиях по корреляции. Расчёт может быть откалиброван на известное значение вязкости нефти при давлении равном давлению насыщения и при пластовой температуре за счёт задания калибровочного параметра `muob_cP`. При калибровке динамика изменения будет соответствовать расчету по корреляции, но значения будут масштабированы таким образом, чтобы при давлении насыщения удовлетворить калибровочному параметру.

При расчёте следует обратить внимание, что значение вязкости коррелирует со значением плотности нефти. Как правило вязкость тяжёлых нефтей выше чем для легких.

При расчёте с использованием набора корреляций на основе корреляции Стендинга - вязкость как дегазированной нефти и нефти с учетом растворенного газа рассчитывается по корреляции Беггса Робинсона [2]. Корреляции для расчета вязкости разгазированной и газонасыщенной нефти, разработанные Beggs & Robinson, основаны на 2000 замерах 600 различных нефтей. Диапазоны значений основных свойств, использованных для разработки данной корреляции, приведены в таблице ниже.

давление, atma	**8.96…483.**
температура, °C	**37…127**
газосодержание, r_s m^3/m^3	**3.6…254**
относительная плотность нефти по воде,, γ_o	**0.725…0.956**

```
' расчет вязкости нефти
Public Function PVT_mu_oil_cP( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение вязкости нефти, сП
' для заданных термобарических условий.
```

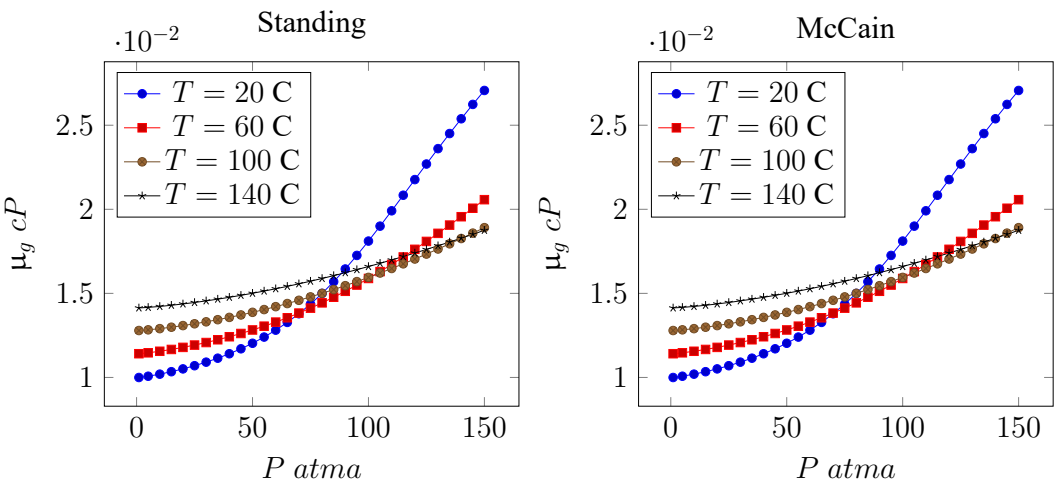


2.6.7. PVT_mu_gas_cP – вязкость газа

Функция рассчитывает вязкость газа при заданных термобарических условиях. Результат расчета в сП. Используется подход предложенный Lee [20], который хорошо подходит для большинства натуральных газов. В отличии от нефти и других жидкостей вязкость газа, как правило, значительно ниже, что определяет высокую

подвижность газа. Более подробное описание методов расчета вязкости газа можно найти на странице http://petrowiki.org/gas_viscosity

```
' расчет вязкости газа
Public Function PVT_mu_gas_cP( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение вязкости газа, сП
' для заданных термобарических условий.
```



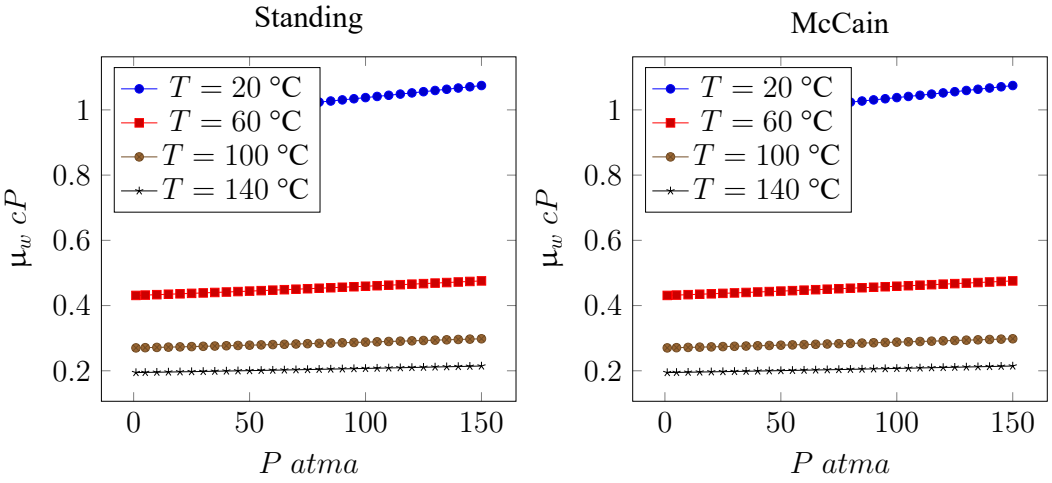
2.6.8. PVT_mu_wat_cP – вязкость воды

Функция рассчитывает вязкость воды при заданных термобарических условиях. Результат расчета выдается в сП. Вязкость воды зависит от давления, температуры и наличия растворенных примесей. В общем вязкость воды растет при росте давления, снижении температуры, повышении солености. Растворение газа почти не влияет на вязкость воды и в расчетах не учитывается. Расчет проводится по корреляции McCain [15]

Более подробное описание методов расчета вязкости газа можно найти на странице http://petrowiki.org/Produced_water_properties

```
' расчет вязкости воды
Public Function PVT_mu_wat_cP( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение вязкости воды, сП
' для заданных термобарических условий.
```

Следует отметить, что вязкость воды достаточно сильно зависит от температуры, в то время как зависимость от давления менее выражена.



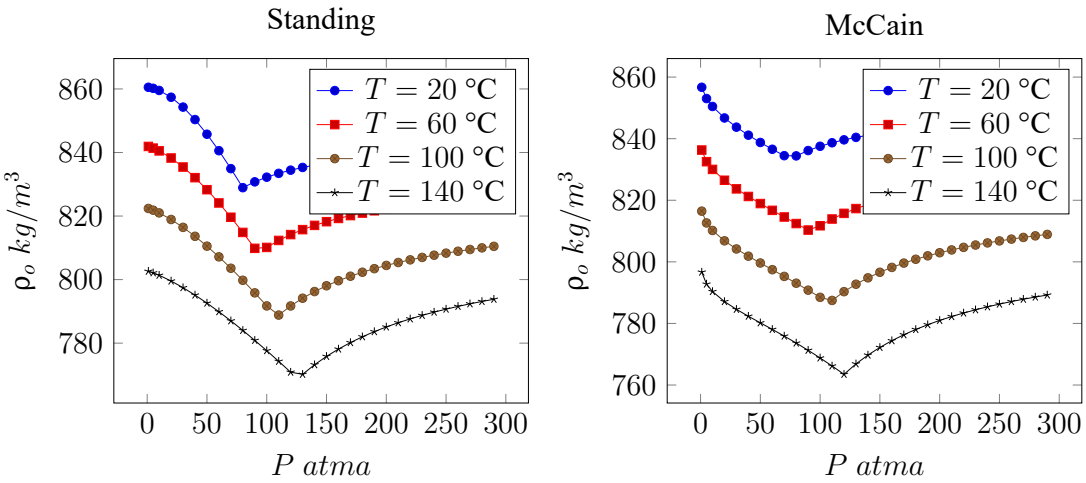
2.6.9. PVT_rho_oil_kgm3 – плотность нефти

Функция вычисляет значение плотности нефти при заданных термобарических условиях. Результат расчёта имеет размерность кг/м3.

$$\rho_{o,rc}(P,T) = 1000\frac{\gamma_o + r_s(P,T)\gamma_g\frac{\rho_{air}}{1000}}{B_o(P,T)}$$

При расчёте плотности нефти при заданных условиях учитывается, что дополнительно к массе нефти при стандартных условиях, определяющей ее плотность, в нефти растворена определённая масса газа, которая должна быть учтена.

```
' расчет плотности нефти в рабочих условиях
Public Function PVT_rho_oil_kgm3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - плотность нефти
'            при заданных термобарических условиях, кг/м3.
```

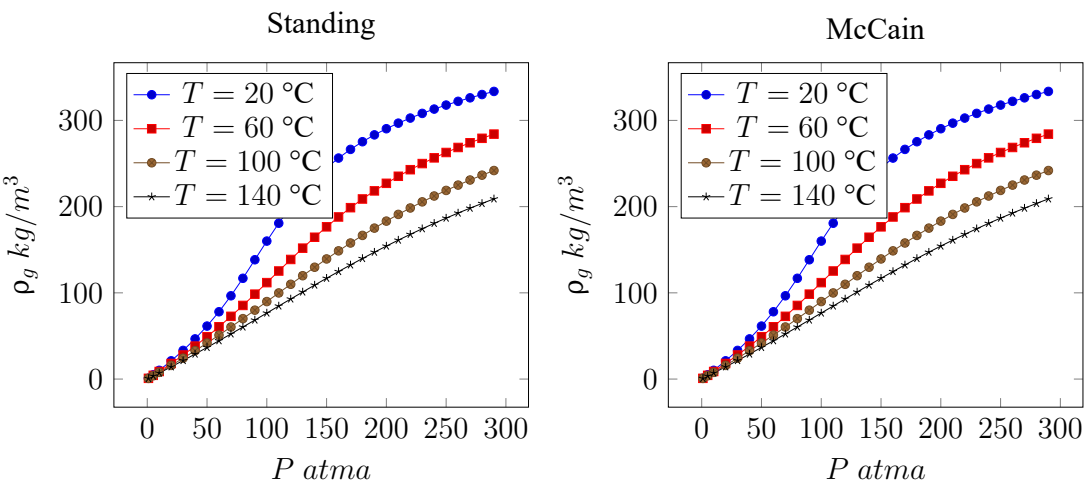


2.6.10. PVT_rho_gas_kgm3 – плотность газа

Плотность газа при заданных термобарических условиях целиком определяется объёмным коэффициентом газа B_g.

$$\rho_{g,rc}(P,T) = \frac{\gamma_g \rho_{air}}{B_g(P,T)}$$

```
' расчет плотности газа в рабочих условиях
Public Function PVT_rho_gas_kgm3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'            используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число - плотность газа
'            при заданных термобарических условиях, кг/м3.
```



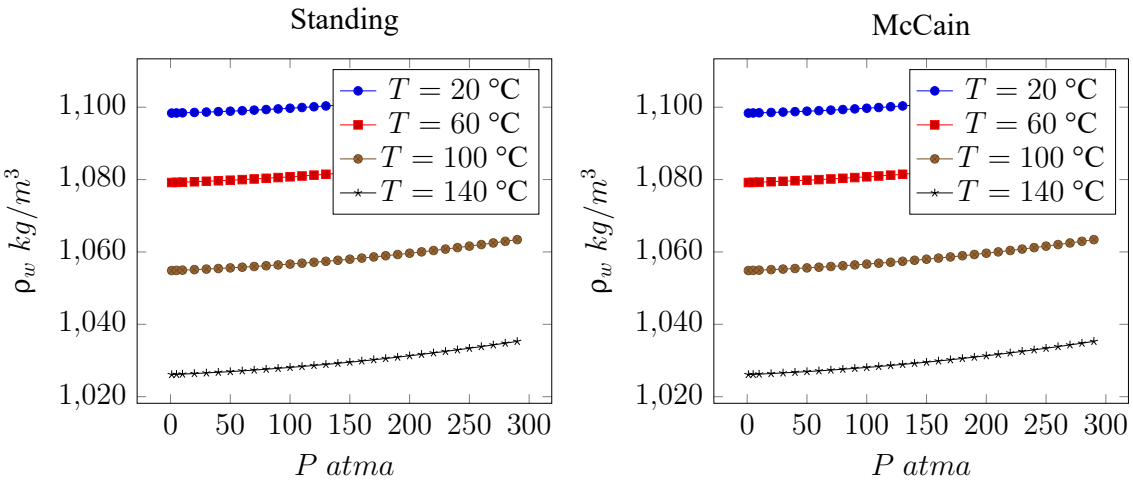
2.6.11. PVT_rho_wat_kgm3 – плотность воды

Плотность воды при заданных термобарических условиях целиком определяется объёмным коэффициентом воды B_w.

$$\rho_{w,rc}(P,T) = \frac{\gamma_w}{B_w(P,T)}$$

```
' расчет плотности воды в рабочих условиях
Public Function PVT_rho_wat_kgm3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
```

```
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число - плотность воды
'           при заданных термобарических условиях, кг/м3.
```



2.6.12. PVT_Z – коэффициент сверхсжимаемости газа

Функция позволяет рассчитать коэффициент сверхсжимаемости газа.

$$PV = z\nu RT$$

Коэффициент сверхсжимаемости задает поправку на объем реального газа по сравнению с идеальным при изменении давления или температуры. https://en.wikipedia.org/wiki/Compressibility_factor. Отличный обзор методов вычисления z можно найти https://github.com/f0nzie/zFactor. Для расчета коэффициента сверхсжимаемости реализовано три варианта. Первый приведенный Беггсом и Бриллом (1973) простой, быстрый но не очень точный, особенно для больших давлений.

$$z = A + \frac{1 - A}{e^B} + Cp_{pr}^D,$$

$$A = 1.39(T_{pr} - 0.92)^{0.5} - 0.36T_{pr} - 0.10,$$
$$B = (0.62 - 0.23T_{pr})p_{pr} + \left(\frac{0.066}{T_{pr} - 0.86} - 0.037\right)p_{pr}^2 + \frac{0.32p_{pr}^2}{10^E}$$
$$C = 0.132 - 0.32\log(T_{pr}),\ D = 10^F,$$
$$E = 9(T_{pr} - 1) \text{ and } F = 0.3106 - 0.49T_{pr} + 0.1824T_{pr}^2$$

Второй вариант метода Дранчук, Абу Кассем (1975), основанный на решении кубического уравнения состояния - более точный, но медленный (так как уравнение решается итерациями)

$$z = \frac{0.27P_{pr}}{yT_{pr}},$$

где y решение уравнения

$$\left[R_5y^2(1 + A_{11}y^2)e^{(-A_{11}y^2)}\right] + R_1y - \frac{R_2}{y} + R_3y^2 - R_4y^5 + 1 = 0$$
$$R_1 = A_1 + \frac{A_2}{T_{pr}} + \frac{A_3}{T_{pr}^3} + \frac{A_4}{T_{pr}^4} + \frac{A_5}{T_{pr}^5}, \quad R_2 = \frac{0.27P_{pr}}{T_{pr}}$$
$$R_3 = A_6 + \frac{A_7}{T_{pr}} + \frac{A_8}{T_{pr}^2}, \quad R_4 = A_9\left(\frac{A_7}{T_{pr}} + \frac{A_8}{T_{pr}^2}\right), \quad R_5 = \frac{A_{10}}{T_{pr}^3}$$
$$A_1 = 0.3265, \quad A_2 = -1.0700, \quad A_3 = -0.5339, \quad A_4 = 0.01569,$$
$$A_5 = -0.05165, \quad A_6 = 0.5475, \quad A_7 = 0.7361, \quad A_8 = 0.1844,$$
$$A_9 = 0.1056, \quad A_{10} = 0.6134, \quad A_{11} = 0.7210$$

Третий вариант (активирован по умолчанию начиная с версии 7.14) вариант Kareem, Al-Marhoun (2015) [18]

$$z = \frac{DP_{pr}(1 + y + y^2 - y^3)}{(DP_{pr} + Ey^2 - Fy^G)(1 - y)^3}$$

$$y = \frac{DP_{pr}}{\left(\frac{1+A^2}{C} - \frac{A^2B}{C^3}\right)},$$

где

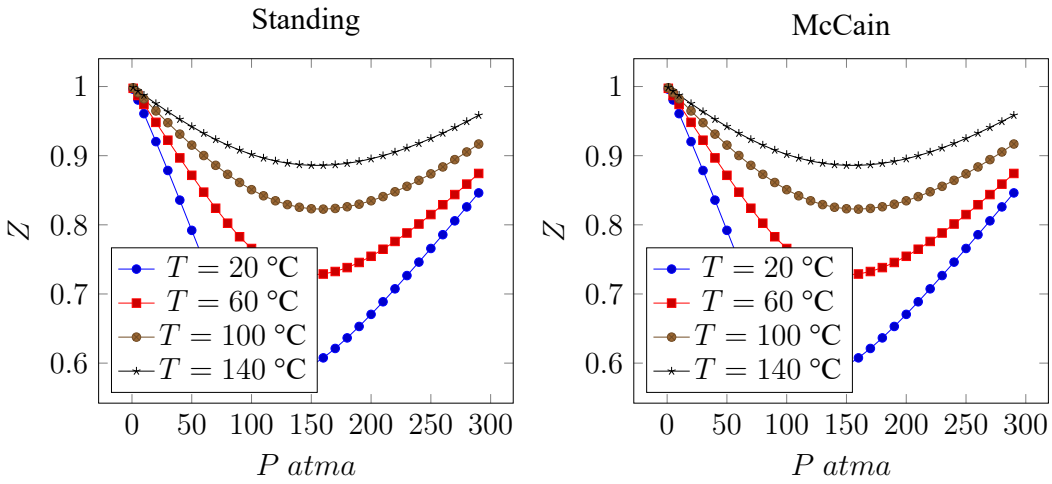
$$t = \frac{1}{T_{pr}},$$
$$A = a_1te^{a_2(1-t)^2}P_{pr}, \quad B = a_3t + a_4t^2 + a_5t^6P_{pr}^6,$$
$$C = a_9 + a_8tP_{pr} + a_7t^2P_{pr}^2 + a_6t^3P_{pr}^3$$
$$D = a_{10}te^{a_{11}(1-t)^2}, \quad E = a_{12}t + a_{13}t^2 + a_{14}t^3,$$
$$F = a_{15}t + a_{16}t^2 + a_{17}t^3, \quad G = a_{18} + a_{19}t$$

a_1	0.317842	a_{11}	−1.966847
a_2	0.382216	a_{12}	21.0581
a_3	−7.768354	a_{13}	−27.0246
a_4	14.290531	a_{14}	16.23
a_5	0.000002	a_{15}	207.783
a_6	−0.004693	a_{16}	−488.161
a_7	0.096254	a_{17}	176.29
a_8	0.166720	a_{18}	1.88453
a_9	0.966910	a_{19}	3.05921
a_{10}	0.063069		

Это вариант реализует явный расчет (без итераций) и обладает достаточно хорошей точностью.

Переключение метода расчета реализуется только в коде атрибутом `zCorr` экземпляра класса `CPVT`.

```
' расчет коэффициента сверхсжимаемости газа
Public Function PVT_z( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Результат - z фактор газа.
'           коэффициент сверхсжимаемости газа,
'           безразмерная величина
```


Standing
McCain
Z
P atma
T = 20 °C
T = 60 °C
T = 100 °C
T = 140 °C
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0
50
100
150
200
250
300

Глава 3. Многофазный поток в трубах, штуцере

3.1. Расчёт свойств потока

В отличии от функций расчета PVT (физико-химических свойств флюидов) функции расчета свойства потока учитывают дополнительные параметры потока флюидов - Q - дебит, объемный расход флюидов, f_w - обводненность, R_p - газовый фактор. В функциях свойств потока используется префикс `feed_`.

Параметры потока, такие как расход ГЖС, доля газа в потоке, вязкость ГЖС важны для расчёта и анализа работы скважин и скважинного оборудования.

3.1.1. feed_q_mix_rc_m3day – расход газожидкостной смеси

Функция позволяет рассчитать объёмный расход газожидкостной смеси при заданных термобарических условиях. Объёмный расход ГЖС важен например для подбора УЭЦН в скважине, так как именно определяет в какой точке характеристики УЭЦН будет работать. При наличии свободного газа в потоке расход ГЖС может быть значительно больше расхода жидкости на поверхности фиксируемого расходомером.

$$Q_{mix,rc} = Q_{w,sc}B_w(P,T) + Q_{o,sc}B_o(P,T) + Q_{o,sc}(R_p - R_s(P,T))B_g(P,T)$$

Расход ГЖС определяется как сумма расходов отдельных фаз, приведённых к соответствующим термобарическим условиям, с учётом того, что часть газа будет растворена в нефти.

```
' функция расчета расхода газо жидкостной смеси (ГЖС)
Public Function feed_q_mix_rc_m3day( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String)
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
```

```
'                используйте encode_feed для генерации
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'                подпись, и лог расчета если подключен
```

3.1.2. feed_rho_mix_kgm3 – плотность газожидкостной смеси

Функция позволяет рассчитать плотность газожидкостной смеси при заданных термобарических условиях.

$$\rho_{mix,rc} = \left(\frac{\rho_{w,sc}}{B_w} f_w + \frac{\rho_{o,sc} + r_s \rho_{g,sc}}{B_o} (1 - f_w) \right) (1 - f_g) + \frac{\rho_{g,sc}}{B_g} f_g$$

```
' функция расчета плотности газо жидкостной смеси (ГЖС)
Public Function feed_rho_mix_kgm3( _
                ByVal p_atma As Double, _
                ByVal t_C As Double, _
                ByVal feed As String)
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'                используйте encode_feed для генерации
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'                подпись, и лог расчета если подключен
```

3.1.3. feed_gas_fraction_d – доля газа в потоке

Функция расчёта доли свободного газа в потоке (без учёта проскальзывания) в зависимости от термобарических условий для заданного флюида.

$$f_g = \frac{Q_{gas_rc}(1 - k_{sep_add})}{Q_{wat_rc} + Q_{oil_rc} + Q_{gas_rc}(1 - k_{sep_add})}$$

где все объёмные расходы фаз приведены в соответствующих термобарических условиях, а $k_{sep,add}$ - дополнительный коэффициент сепарации, учитывающий удаление части свободного газа из потока.

Доля газа в потоке является одним из ключевых параметров ограничивающих производительность систем механизированной добычи - ЭЦН и других насосов.

```
' функция расчета коэффициента Джоуля Томсона
Public Function feed_gas_fraction_d( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal ksep_add_fr As Double = 0)
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' ksep_add_fr - коэффициент сепарации газа из потока
' результат  - значение доли газа в потоке (расходна доля)
```

3.1.4. feed_p_gas_fraction_atma – целевое давления для заданной доли газа в потоке

Функция расчёта давления при котором достигается заданная доля свободного газа в потоке (без учёта проскальзывания). Значение давления при котором достигается определённая доля газа в потоке может быть найдено из решения уравнения, определяющего долю газа.

$$f_g = \frac{Q_{gas_rc}(1 - k_{sep_add})}{Q_{wat_rc} + Q_{oil_rc} + Q_{gas_rc}(1 - k_{sep_add})}$$

Решение в Unifloc 7.31 VBA реализовано итеративное, методом деления отрезка пополам (дихотомия). При вызове функции пересчитывается состояние смеси с различными термобарическими условиями. Поэтому расчёт проводится относительно медленно.

Задание k_{sep_add} позволит оценить целевое давление на приеме для ЭЦН при известной доли газа и известном ожидаемом значении сепарации газа. Отметим, что значение сепарации может быть оценено по корреляционным зависимостям. Но такие зависимости требуют знания давления сепарации, а следовательно их учет совместно с алгоритмом расчета давления при котором достигается определенная доля газа потребует итеративного решения, что выходит за рамки данной функции (например

из за того, что это потребует задания дополнительных параметров конфигурации скважины).

```
' расчет давления при котором
' достигается заданная доля газа в потоке
Public Function feed_p_gas_fraction_atma( _
               ByVal free_gas_d As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal ksep_add_fr As Double = 0)
' free_gas_d - допустимая доля газа в потоке;
' t_C        - температура, C.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' ksep_add_fr - коэффициент сепарации газа из потока
' результат  - число - давление
```

3.1.5. feed_rp_gas_fraction_m3m3 – целевой газовый фактор для заданной доли газа в потоке

Функция расчёта газового фактора R_p при котором достигается заданная доля свободного газа в потоке (без учёта проскальзывания) . Значение давления при котором достигается определённая доля газа в потоке может быть найдено из решения уравнения, определяющего долю газа.

$$f_g = \frac{Q_{gas_rc}(1 - k_{sep_add})}{Q_{wat_rc} + Q_{oil_rc} + Q_{gas_rc}(1 - k_{sep_add})}$$

Решение в Unifloc 7.31 VBA реализовано с использованием итераций, методом деления отрезка пополам (дихотомия). При вызове функции состояние смеси пересчитывается с различными термобарическими условиями. Поэтому расчёт проводится относительно медленно.

Задание k_{sep_add} позволит оценить целевой газовый фактор при известной доли газа, давлении на приеме и ожидаемом значении сепарации газа. Отметим, что значение сепарации может быть оценено по корреляционным зависимостям. Но такие зависимости требуют знания как давления сепарации так и газового фактора, а следовательно их учет совместно с алгоритмом расчета газового фактора при

котором достигается определенная доля газа потребует итеративного решения, что выходит за рамки данной функции (например из за того, что это потребует задания дополнительных параметров конфигурации скважины).

```
' расчет газового фактора
' при котором достигается заданная доля газа в потоке
Public Function feed_rp_gas_fraction_m3m3( _
               ByVal free_gas_d As Double, _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal ksep_add_fr As Double = 0)
' free_gas_d - допустимая доля газа в потоке;
' t_C        - температура, C.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' ksep_add_fr - коэффициент сепарации газа из потока
' результат  - число - давление,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

3.2. Сепарация газа в скважине

В скважинах оборудованных системами механизированной добычи нефти важную роль играет процесс сепарации газа на приёме насоса. Под сепарацией газа понимается отделение части свободного газа из потока и перенаправление его по отдельному гидравлическому каналу на поверхность. В результате сепарации газа меняются свойства флюида, поступающего в насос и НКТ выше насоса. В частности меняются давление насыщения и газосодержание при давлении насыщения для флюида после сепарации. Более детальные модели флюида и сепарации могут показать, что при сепарации может поменяться и другие параметры - например состав газа после разгазирования. В модели нелетучей нефти реализованной в Unifloc 7.31 VBA эти эффекты не учитываются.

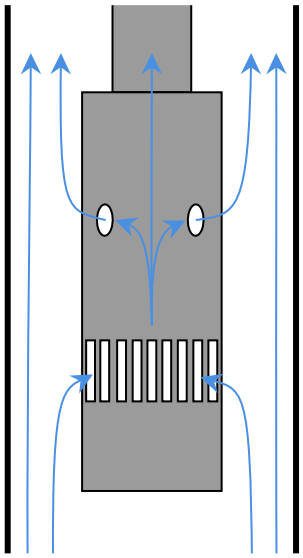


Рис. 3.1 — Схема линий тока газа на приеме ЭЦН

В скважине с ЭЦН работают два механизма сепарации свободного газа из потока, схематично показанные на рисунке 3.1 - естественная или натуральная сепарация газа, когда часть свободного газа за счет сил всплытия проходит мимо приема насоса и искусственная сепарация с применением газосепаратора, когда часть свободного газа выталкивается из насоса, обычно за счет центробежных сил.

Оценка этих механизмов, а также расчёт общей сепарации могут быть проведены приведёнными ниже функциями.

3.2.1. well_ksep_natural_d – естественная сепарация газа

Функция рассчитывает естественную сепарацию газа на приёме насоса в скважине с использованием корреляции Маркеса [32] . Результат - безразмерная величина в диапазоне от 0 до 1.

```
' расчет натуральной сепарации газа на приеме насоса
Public Function well_ksep_natural_d( _
             ByVal feed As String, _
             ByVal p_intake_atma, _
    Optional ByVal t_intake_C = 50, _
    Optional ByVal d_intake_mm As Double = 90, _
    Optional ByVal d_cas_mm As Double = 120)
```

```
' feed          - закодированные параметры потока флюидов
' p_intake_atma - давление сепарации
' t_intake_C    - температура сепарации
' d_intake_mm   - диаметр приемной сетки
' d_cas_mm      - диаметр эксплуатационной колонны
' результат     - число - естественная сепарация
```

Функция `well_ksep_natural_d` поддерживает передачу параметров давления, температуры и свойств потока в виде списка значений. Список должен быть json строкой кодирующей список. Числовые параметры – давление, температура могут быть закодированы функцией `encode_arange` или являться результатами расчетов других функций. Список потоков может быть закодирован функцией `encode_feed_list`. Расчет списка включается если хотя бы один из параметров передан в виде списка. В таком случае остальные параметры меняться не будут. Результаты расчета выводятся в виде словаря результатов, содержащего исходные списки с которыми проводился расчет и список рассчитанных значений коэффициента сепарации.

Таблица 9 — Вывод функции `feed_mod_separate_gas` при расчете по списку значений

№	Ключ	Описание значения
1	`p_atma`	список значений давления использованных для расчета
2	`t_C`	список значений температуры использованных для расчета
3	`k_sep`	список рассчитанных значений коэффициента сепарации
4	`feed`	список параметров потока использованных для проведения расчетов

Для извлечения результатов расчета из словаря можно использовать функцию `decode_json`. Для упрощенного извлечения отдельных списков подходят соответствующие функции: `decode_json_p_atma`, `decode_json_t_C`, `decode_json_q_liq_sm3day`.

3.2.2. well_ksep_total_d – общая сепарация газа

Функция рассчитывает полную сепарацию газа на приёме насосе в скважине по известным значениям естественной сепарации газа и коэффициента сепарации газосепаратора. Результат - безразмерная величина в диапазоне от 0 до 1.

$$K_{sep_total} = K_{sep_nat} + (1 - K_{sep_nat})K_{sep_gassep}$$

```
' расчет общей сепарации на приеме насоса
Public Function well_ksep_total_d( _
        ByVal SepNat, _
        ByVal SepGasSep As Double)
' SepNat        - естественная сепарация
' SepGasSep     - искусственная сепарация (газосепаратор)

    Dim sep_nat
    Dim i As Integer
    Dim c As New Collection

    sep_nat = parse_list(SepNat)
    If UBound(sep_nat) - LBound(sep_nat) + 1 = 1 Then
        well_ksep_total_d = SepNat + (1 - SepNat) * SepGasSep
    Else
        For i = LBound(sep_nat) To UBound(sep_nat)
            c.Add sep_nat(i) + (1 - sep_nat(i)) * SepGasSep
        Next i
        well_ksep_total_d = ConvertToJson(c)
    End If
End Function
```

Функция `well_ksep_total_d` поддерживает передачу параметра коэффициента натуральной сепарации в виде списка значений. Список должен быть json строкой кодирующей список. Результаты расчета, если значения натуральной сепарации заданы в виде списка выводятся также в виде списка результатов.

3.3. Расчёт многофазного потока в штуцере

Штуцер или локальное гидравлическое сопротивление - элемент скважины или системы трубопроводов, применяемых для создания дополнительного перепада давления в системе и ограничения потока. Возможны различные варианты реализации штуцера - со штуцерной камерой, с угловым краном, позволяющим менять диаметр штуцера и другие. Ключевым параметром штуцера является диаметр d_{choke} определяющий его способность к ограничению потока.

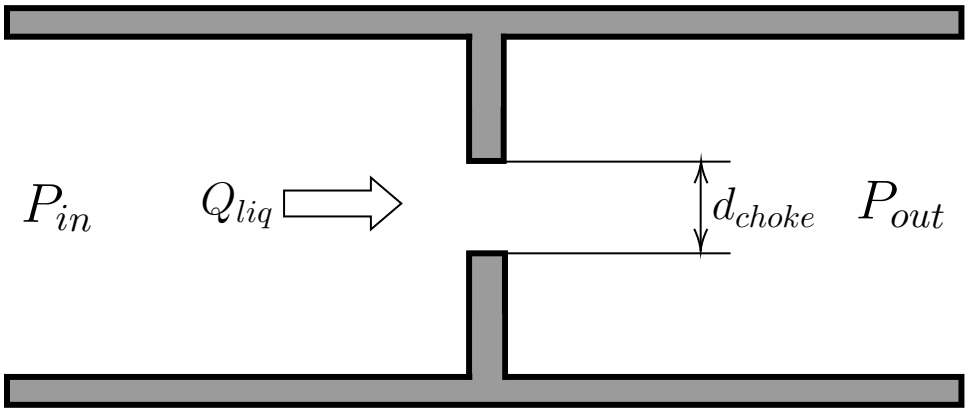


Рис. 3.2 — Схема локального гидравлического сопротивления - штуцера

Как и у любого элемента гидравлического потока есть три ключевых параметра - давление на входе P_{in}, давление на выходе P_{out} и расход газожидкостной смеси, обычно задаваемый в стандартных условиях Q_{liq}. Задание любых двух элементов позволяет вычислить третий. При задании трех элементов модель штуцера может быть настроена на замеры за счёт подбора калибровочного параметра.

Следует обратить внимание, расчёт перепада давления в штуцере сильно зависит от направления расчёта. При фиксированном давлении на выходе P_{out}, что для скважины и штуцера на устье соответствует заданному давлению в линии, для любого расхода ГЖС через штуцер можно найти соответствующее значение давления на входе, пример показан на рисунке 3.3.

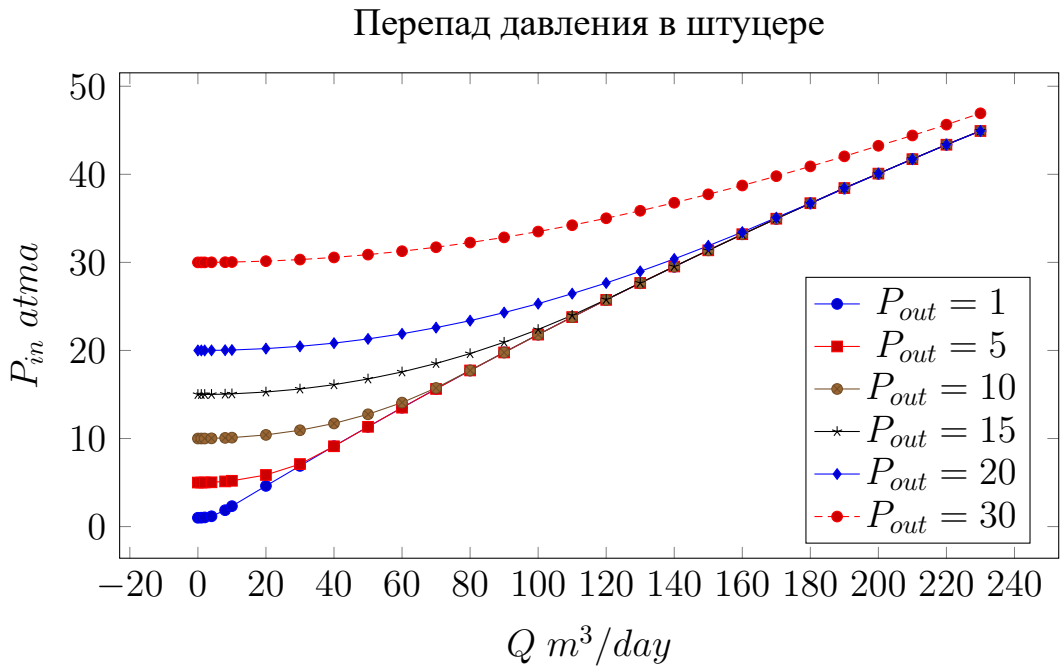


Рис. 3.3 — Кривые зависимости давления на входе в штуцер от дебита при фиксированном давлении на выходе из штуцера P_{out}

А вот при фиксированном давлении на входе P_{in} или фиксированном буферном давлении P_{buf} не для всякого расхода ГЖС можно рассчитать давление на выходе, смотри рисунок 3.4. При фиксированном давлении на входе P_{in} существует максимальный расход ГЖС, который можно прокачать через штуцер с заданным диаметром проходного канала. Такой расход называется критическим. При критическом расходе в канале штуцера скорость потока достигает скорости звука и давление на входе перестаёт зависеть от давления за штуцером. Величина критического расхода через штуцер зависит от давления на входе, поскольку с повышением давления увеличивается скорость звука в среде.

Вертикальная линия на графике зависимости давления на выходе P_{out} от дебита при критическом расходе показывает, что давление не определяется однозначно, а может принимать любое значение на вертикальной линии. Подобная неоднозначность расчётного давления на выходе штуцера может осложнять расчёты и должна учитываться инженером разрабатывающим расчётный модуль или проводящим расчёты.

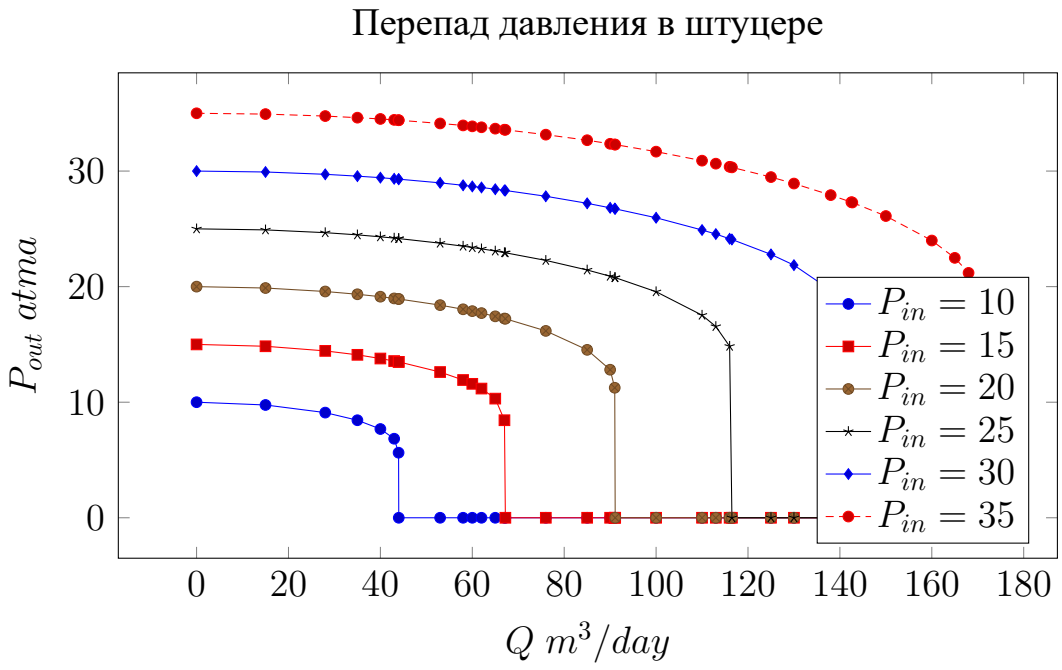


Рис. 3.4 — Кривые зависимости давления на выходе из штуцера от дебита при фиксированном давлении на входе в штуцер P_{in}

Функции расчета штуцера позволяют настроить модель штуцера на замерные данные. Настройка проводится за счет безразмерного параметра калибровки c_{calibr}, в коде `calibr`. Параметр калибровки c_{calibr} применяется как множитель на дебит при расчете характеристики штуцера.

$$Q_{real} = Q_{calc} * c_{calibr}$$

Таким образом $c_{calibr} = 1$ отключает калибровку. А изменение c_{calibr} позволит изменить характеристику штуцера для согласования с измерениями, пример показан на рисунке 3.5.

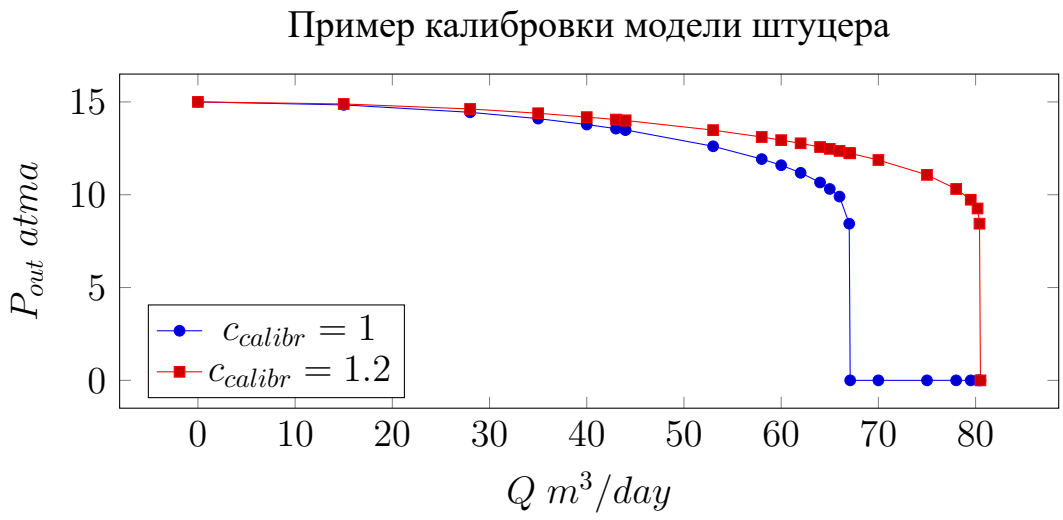


Рис. 3.5 — Кривые зависимости давления на выходе из штуцера от дебита при фиксированном давлении на входе в штуцер P_{in}

Все функции для расчета штуцера содержат в названии слово `choke`.

Результатом работы функций является массив либо число либо массив значений содержащий давление на входе в штуцер P_{in}, давление на выходе из штуцера P_{out}, температуру потока в штуцере T_{choke}, калибровочный коэффициент штуцера c_{calibr} и другие параметры. Регулируется опцией `show_array=1` в аргументе `param`. Выходной массив содержит две строки - в первой находятся значения, во второй подписи. Это позволяет при необходимости вывести только значения в той же строке в которой проводился расчет.

Для вывода массива в Excel следует выбрать необходимый диапазон ячеек, в который будут выводится результаты в виде массива, затем ввести в адресную строку вызов функции и нажать комбинацию клавиш - Cntrl-Shift-Enter. После этого название функции в адресной строке должно отображаться в фигурных скобках, рисунок 3.6. При необходимости внести коррективы в вызов функции также необходимо подтверждать свои действия комбинацией клавиш Cntrl-Shift-Enter.

3.3.1. MF_choke_p_atma – Расчет давления на входе или на выходе штуцера

Функция позволяет рассчитать давление на входе или выходе штуцера по известному давлению на противоположном конце при известных параметрах пото-

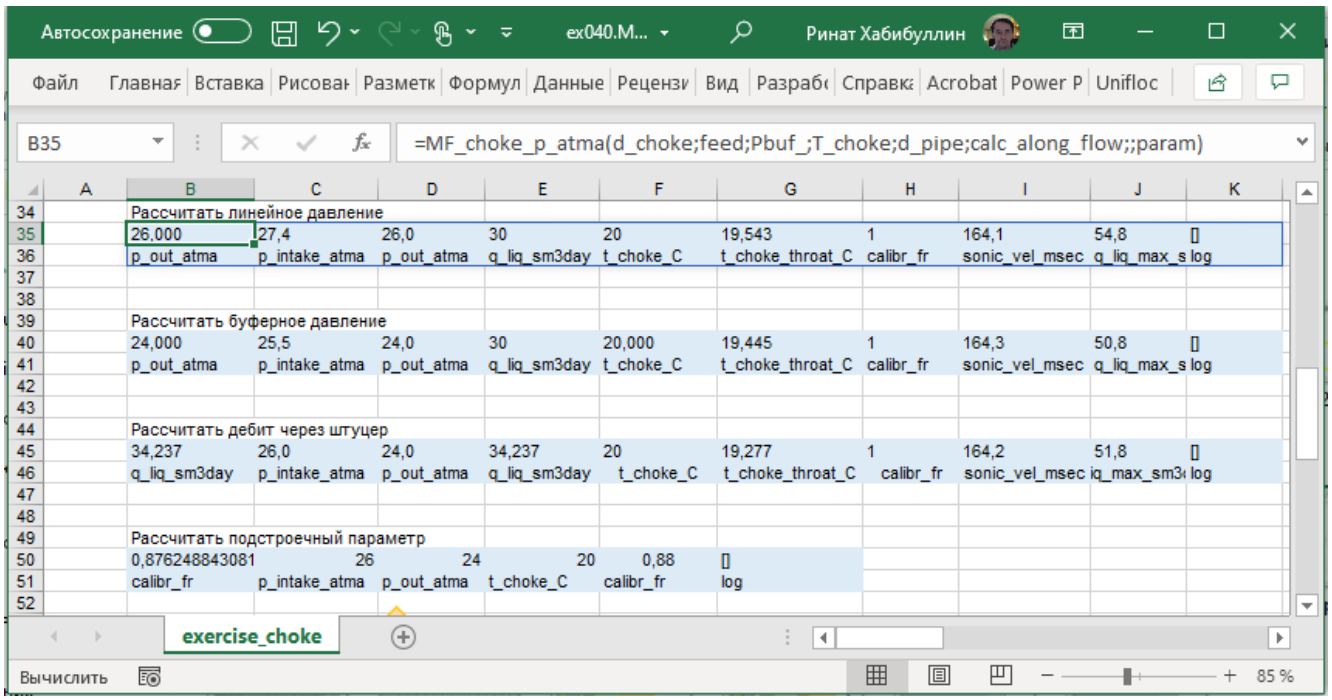


Рис. 3.6 — Пример вывода результата расчета в массив

ка (дебите жидкости, обводнённости, газовому фактору). Расчёт проводится по корреляции Перкинса [33] с учётом многофазного потока.

```
' расчет давления в штуцере (дросселе)
Public Function MF_choke_p_atma( _
                    ByVal d_choke_mm As Double, _
                    ByVal feed As String, _
                    ByVal p_calc_from_atma, _
            Optional ByVal t_choke_C = 20, _
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
            Optional ByVal calibr As Double = 1, _
            Optional ByVal param As String = "")
' d_choke_mm       - диаметр штуцера (эффективный)
' feed       - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'            функции encode_feed() или encode_feed_list()
' p_calc_from_atma - давление с которого начинается расчет, атм
'                   граничное значение для проведения расчета
'                   либо давление на входе, либо на выходе.
'                    может быть списком.
' t_choke_C        - температура потока, C.
'                    может быть списком.
' d_pipe_mm        - диаметр трубы до и после штуцера
' calc_along_flow - флаг направления расчета относительно потока
' param            - параметры расчета json строка
```

```
' результат        - число или массив значений с параметрами штуцера
'                    и давление на штуцере на расчетной стороне.
```

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 10 — Параметры функции `MF_choke_p_atma` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`num_value`	Номер параметра выводимого на первом месте. Позволяет подменить выводимый параметр при `show_array=0` на необходимый. Номера можно определить по расширенному выводу при `show_array=1`

При включенной опции `show_array=1` результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода результата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу ”протягиванием”на несколько строк.

Таблица 11 — Расширенные результаты расчета

№	Параметр	Описание
0	Параметр по умолчанию	Параметр который выводится при `show_array=0` или при подавлении вывода массива. Может быть настроен опцией `num_value`
1	`p_intake_atma`	Давление на входе в штуцер, атм
2	`p_out_atma`	Давление на выходе из штуцер, атм
3	`q_liq_sm3day`	Расход жидкости в стандартных условиях через штуцер, $м^3$/сут
4	`t_choke_C`	Температура флюида на входе и выходе из штуцера, С
5	`t_choke_throat_C`	Температура флюида внутри штуцера, в области с наибольшей скоростью, С
6	`calibr_fr`	Калибровочный параметр для модели штуцера
7	`sonic_vel_msec`	Скорость звука для флюида в проходном сечении штуцера, м/сек
8	`q_liq_max_sm3day`	Максимально возможный дебит жидкости через штуцер при заданном давлении на входе, $м^3$/сут
9	`log`	Лог расчета, выводится при `show_log = 1`

При расчете предполагается, что температура флюида в штуцере не изменяется, однако в проходном сечении штуцера в корреляции Перкинса учитывается снижение температуры газа при снижении давления. Расчетное значение температуры выводится в как `t_choke_throat_C`. Также выводится скорость звука в сечении `sonic_vel_msec`, которая достигается при критическом потока флюида и также выводится дебит `q_liq_max_sm3day` при котором критический поток достигается.

Функция `MF_choke_p_atma` поддерживает передачу параметров давления, температуры и свойств потока в виде списка значений. Список должен быть json строкой кодирующей список. Числовые параметры – давление, температура могут быть закодированы функцией `encode_arange` или являться результатами

расчетов других функций. Список потоков может быть закодирован функцией `encode_feed_list`. Расчет списка включается если хотя бы один из параметров передан в виде списка. В таком случае остальные параметры меняться не будут. Результаты расчета выводятся в виде словаря результатов, содержащего исходные списки с которыми проводился расчет и список рассчитанных значений коэффициента сепарации.

Таблица 12 — Вывод функции `MF_choke_p_atma` при расчете по списку значений

№	Ключ	Описание значения
1	`p_atma`	список значений давления – результат расчета функции
2	`t_C`	список значений температуры – результат расчета функции
3	`feed`	список параметров потока использованных для проведения расчетов

Для извлечения результатов расчета из словаря можно использовать функцию `decode_json`. Для упрощенного извлечения отдельных списков подходят соответствующие функции: `decode_json_p_atma`, `decode_json_t_C`, `decode_json_q_liq_sm3day`.

3.3.2. MF_choke_q_sm3day – функция расчёта дебита жидкости через штуцер

Функция позволяет рассчитать по известному буферному давлению и линейному давлению дебит жидкости. Расчет проводится по корреляции Перкинса [33] с учетом многофазного потока.

```
' расчет давления в штуцере
Public Function MF_choke_q_sm3day( _
                    ByVal feed As String, _
                    ByVal d_choke_mm As Double, _
                    ByVal p_in_atma As Double, _
                    ByVal p_out_atma As Double, _
            Optional ByVal t_choke_C = 20, _
```

```
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal calibr As Double = 1, _
            Optional ByVal param As String = "")
' feed          - закодированная строка с параметрами потока.
' d_choke_mm    - диаметр штуцера (эффективный)
' p_in_atma     - давление на входе в штуцер, атм.
'                 высокая сторона
' p_out_atma    - давление на выходе из штуцера, атм.
'                 низкая сторона
' t_choke_C     - температура потока, С.
' d_pipe_mm     - диаметр трубы до и после штуцера
' param         - параметры расчета json строка
' результат     - число - массив значений с параметрами штуцера
'                 и давление на штуцере на расчетной стороне.
```

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 13 — Параметры функции `MF_choke_q_sm3day` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`num_value`	Номер параметра выводимого на первом месте. Позволяет подменить выводимый параметр при `show_array=0` на необходимый. Номера можно определить по расширенному выводу при `show_array=1`

При включенной опции `show_array=1` результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода ре-

зультата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу ”протягиванием”на несколько строк.

Таблица 14 — Расширенный вывод функции `MF_choke_q_sm3day`

№	Параметр	Описание
0	Параметр по умолчанию	Параметр который выводится при `show_array=0` или при подавлении вывода массива. Может быть настроен опцией `num_value`
1	`p_intake_atma`	Давление на входе в штуцер, атм
2	`p_out_atma`	Давление на выходе из штуцер, атм
3	`q_liq_sm3day`	Расход жидкости в стандартных условиях через штуцер, $м^3$/сут
4	`t_choke_C`	Температура флюида на входе и выходе из штуцера, С
5	`t_choke_throat_C`	Температура флюида внутри штуцера, в области с наибольшей скоростью, С
6	`calibr_fr`	Калибровочный параметр для модели штуцера
7	`sonic_vel_msec`	Скорость звука для флюида в проходном сечении штуцера, м/сек
8	`q_liq_max_sm3day`	Максимально возможный дебит жидкости через штуцер при заданном давлении на входе, $м^3$/сут
9	`log`	Лог расчета, выводится при `show_log = 1`

3.3.3. MF_choke_calibr_fast – простая и быстрая функция настройки модели штуцера

Функция позволяет рассчитать корректирующий фактор для модели штуцера, позволяющий согласовать результаты замеров давления и дебита. Расчет проводится по корреляции Перкинса [33] с учетом многофазного потока.

Это быстрый способ расчета калибровочного коэффициента. По факту он просто вычисляется исходя из модели штуцера. В более сложной функции калибровки `MF_calibr_choke` расчет будет проводится дольше, так как подстроечные параметры подбираются итеративным алгоритмом, зато имеется возможность подбора нескольких различных параметров.

```
' расчет корректирующего фактора (множителя) модели штуцера под замеры
' быстрый расчет - калибровка вычисляется
Public Function MF_choke_calibr_fast( _
            ByVal feed As String, _
            ByVal d_choke_mm As Double, _
            Optional ByVal p_in_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal p_out_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal t_choke_C As Double = 20, _
            Optional ByVal param As String = "")
' feed          - закодированная строка с параметрами потока.
' d_choke_mm     - диаметр штуцера (эффективный), мм
' p_in_atma      - давление на входе (высокой стороне)
' p_out_atma     - давление на выходе (низкой стороне)
' d_pipe_mm      - диаметр трубы до и после штуцера, мм
' t_choke_C      - температура, C.
' param         - параметры расчета json строка
' результат      - число - калибровочный коэффициент для модели.
'                  штуцера  - множитель на дебит через штуцер
```

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 15 — Параметры функции `MF_choke_calibr_fast` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`num_value`	Номер параметра выводимого на первом месте. Позволяет подменить выводимый параметр при `show_array=0` на необходимый. Номера можно определить по расширенному выводу при `show_array=1`

При включенной опции `show_array=1` результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода результата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу ”протягиванием”на несколько строк.

Таблица 16 — Расширенный вывод функции `MF_choke_calibr_fast`

№	Параметр	Описание
0	`calibr_fr`	Параметр калибровки или другой параметр в зависимости от значения опции `num_value`
1	`p_intake_atma`	Давление на входе в штуцер, атм
2	`p_out_atma`	Давление на выходе из штуцер, атм
3	`t_choke_C`	Температура флюида на входе и выходе из штуцера, С
4	`calibr_fr`	Параметр калибровки
5	`log`	Лог расчета, выводится при `show_log = 1`

3.3.4. MF_choke_calibr – продвинутая функция настройки модели штуцера

Функция позволяет рассчитать корректирующий фактор для модели штуцера, позволяющий согласовать результаты замеров давления и дебита. Расчет проводится по корреляции Перкинса [33] с учетом многофазного потока.

Настройка может проводиться за счет подбора различных параметров. Тип калибровки выбирается параметром `calibr_type`. В текущей реализации может быть подобран только один из перечисленных ниже параметров.

- `calibr_type=0` Калибровочный коэффициент многофазной корреляции для гравитационной составляющей c_{calibr_grav}. Ищется в диапазоне от 0.5 до 1.5.
- `calibr_type=1` Калибровочный коэффициент многофазной корреляции для трения c_{calibr_fric}. Ищется в диапазоне от 0.5 до 1.5.
- `calibr_type=2` Газовый фактор R_p. Ищется в диапазоне $[20, 2R_p]$ относительно заданного газового фактора.
- `calibr_type=3` Обводненность f_w. Значение ищется в диапазоне $[0, 1]$.
- `calibr_type=4` Дебит жидкости Q_{liq}. Значение ищется в диапазоне от $[0..Q_{liq} \cdot 1.5]$ относительно заданного дебита жидкости.

– `calibr_type=5` Дебит газа Q_{gas}. Значение ищется в диапазоне от $[0..Q_{gas} \cdot 2]$ относительно заданного дебита газа или в диапазоне $[0..10000]$ м^3/сут если дебит газа не задан.

Результат расчета - массив с подобранным параметром или сообщением о невозможности подбора, информацией о количестве итераций.

```
' расчет корректирующего фактора (множителя) модели штуцера под замеры
' медленный расчет - калибровка подбирается
Public Function MF_choke_calibr( _
            ByVal feed As String, _
            ByVal d_choke_mm As Double, _
            Optional ByVal p_in_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal p_out_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal calibr_type As Integer = 0, _
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal t_choke_C As Double = 20, _
            Optional ByVal param As String = "")

' feed          - закодированная строка с параметрами потока.
' d_choke_mm     - диаметр штуцера (эффективный), мм
' p_in_atma      - давление на входе (высокой стороне)
' p_out_atma     - давление на выходе (низкой стороне)
' d_pipe_mm      - диаметр трубы до и после штуцера, мм
' t_choke_C      - температура, C.
' param         - параметры расчета json строка
' результат      - число - калибровочный коэффициент для модели.
'                  штуцера  - множитель на дебит через штуцер
```

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 17 — Параметры функции `MF_choke_calibr` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.

При включенной опции `show_array=1` результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода результата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу ”протягиванием”на несколько строк.

Таблица 18 — Расширенный вывод функции `MF_choke_calibr`

№	Параметр	Описание
0	`result`	json строка с результатами расчета подстраиваемого параметра
1	`last calc`	json строка с результатами расчета параметров штуцера для подобранного параметра
2	`feed`	Параметры потока использованные для расчета в виде json строки
3	`log`	Лог расчета, выводится при `show_log = 1`

Таблица 19 — json строка с результатами расчета функции `MF_choke_calc`

№	Параметр	Описание
1	`p_intake_atma`	Давление на входе в штуцер, атм
2	`p_out_atma`	Давление на выходе из штуцер, атм
3	`t_choke_C`	Температура флюида на входе и выходе из штуцера, С
4	`calibr_fr`	Калибровочный параметр для модели штуцера
5	`q_liq_sm3day`	Расход жидкости в стандартных условиях через штуцер, м^3/сут
6	`q_gas_sm3day`	Расход газа в стандартных условиях через штуцер, м^3/сут
7	`q_gas_free_sm3day`	Расход свободного газа (дополнительного к растворенному) в стандартных условиях через штуцер, м^3/сут
8	`rp_m3m3`	Газовый фактор потока
9	`fw_perc`	Обводненность потока, в процентах
10	`t_choke_throat_C`	Температура флюида внутри штуцера, в области с наибольшей скоростью, С
11	`sonic_vel_msec`	Скорость звука для флюида в проходном сечении штуцера, м/сек
12	`q_liq_max_sm3day`	Максимально возможный дебит жидкости через штуцер при заданном давлении на входе, м^3/сут

3.4. Расчет многофазного потока в трубе

Для расчёта участка трубы с использованием пользовательских функций Unifloc 7.31 VBA применяется схема показанная на рисунке 3.7. Труба задается набором значений измеренной $[L_0, L_1,..,L_n]$ и вертикальных $[H_{vn}, H_{vn},..,H_{vn}]$ глубин, описывающих траекторию и набором значений измеренной глубины $[L_0, L_1,..,L_k]$ и диаметров $[d_0, d_1,..,d_k]$. Для каждой точки трубы значения угла наклона и диаметра этого участка определяется линейной интерполяцией соответствующих массивов. Для формирования данных в виде json строки можно использовать функцию `encode_pipe`.

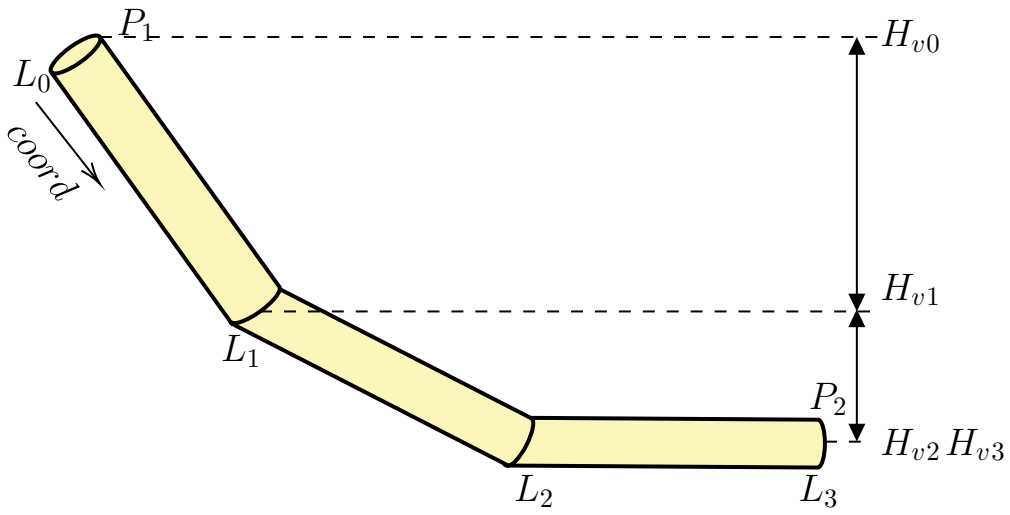


Рис. 3.7 — Схема трубы принятая для расчётов с использованием пользовательских функций

Координата трубы возрастает от начала к концу (исходные массивы всегда будут автоматически сортироваться). Относительно направления координаты задаются направление расчета и направление потока соответствующими параметрами расчетных функций `calc_along_coord` и `flow_along_coord`

Труба имеет постоянную по всей длине шероховатость стенок. Шероховатость влияет на коэффициент трения при расчете потока и проявляется при относительно больших скоростях потока. Подробнее про шероховатость и трение в потоке жидкости можно почитать в [34]

3.4.1. Задание конструкции трубы encode_pipe

Детальная конструкция трубы включая траекторию и диаметры может быть сформирована в виде json строки с использованием функции encode_pipe.

```
' задание параметров траектории трубы в json строке
Public Function encode_pipe(Optional h_list_m As Variant = 1000, _
                            Optional diam_list_mm As Variant = 62, _
                            Optional roughness_m As Double = 0)
' h_list_m - число - длина вертикальной трубы или массив или range
'         содержащий зависимость вертикальной глубины от измеренной
' diam_list_mm - число-внутренний диаметр трубы или массив или range
'         содержащий зависимость внутреннего от измеренной глубины
' roughness_m - число - шероховатость, одна для всей трубы
' результат - json строка с описанием трубы
```

3.4.2. Задание температурных параметров для расчета трубы encode_t_model

Расчет трубы может быть проведен с использованием нескольких температурных моделей, выбор которых определяется опцией t_model набора параметров температурной модели задаваемых json строкой, которую можно сгенерировать функцией encode_t_model

```
' кодирование параметров температурной модели трубы/скважины
Public Function encode_t_model( _
            Optional t_model As TEMP_CALC_METHOD = StartEndTemp, _
            Optional t_list_C As Variant = 50, _
            Optional t_start_C As Double = -100, _
            Optional t_end_C As Double = -100, _
            Optional param As String = "")
' t_model   - номер температурной модели
' t_list_C  - массив n*2 распределения температуры
' t_start_C - температура в начале трубы
' t_end_C   - температура в конце трубы
' param     - параметры температурной модели
'             список параметров в мануале
```

доступные модели

Таблица 20 — Доступные модели расчета температуры

№	Параметр	Описание
1	`t_model = 0`	Значение по умолчанию. Температура линейно меняется по длине трубы, задается значениями температуры на концах трубы, опции `t_start_C` и `t_end_C`
2	`t_model = 1`	Температура флюида равна заданной температуре окружающей среды. Температура окружающей среды задается опцией `t_list_C`
3	`t_model = 2`	Температура флюида рассчитывается с учетом заданной температуры окружающей среды и теплопотерь. Температура окружающей среды задается опцией `t_list_C`. Параметры теплопередачи задаются соответствующими опциями
4	`t_model = 3`	Температура флюида равна заданной температуре относительно измеренной глубины.Заданная температура задается опцией `t_list_C`

Значения опций закодированных в json строке меняются в зависимости от выбранной модели. Часть опций можно задать с использованием аргумента функции `param`.

Опции для `t_model = 2` приведены в таблице ниже. Расчетная модель реализована на основе работы [35].

Таблица 21 — Параметры функции `encode_t_model` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`thermal_conductivity_formation_WmC`	Теплопроводность пласта
`specific_heat_capacity_formation_JkgC`	Теплоемкость пласта
`thermal_conductivity_cement_WmC`	Теплопроводность цемента вокруг скважины
`thermal_conductivity_tubing_WmC`	Теплопроводность НКТ
`thermal_conductivity_casing_WmC`	Теплопроводность эксплуатационной колонны
`heat_transfer_casing_liquid_Wm2C`	Температуропроводность межтрубного пространства с жидкостью
`heat_transfer_casing_gas_Wm2C`	Температуропроводность межтрубного пространства с газом
`heat_transfer_fluid_convection_Wm2C`	Температуропроводность флюида в НКТ за счет конвекции
`time_calc_hr`	Время расчета

Значения по умолчанию для приведенных величин можно узнать запустив функцию `encode_t_model` без параметров и расшифровав ее результаты функцией `dencode_json`. Размерности опций указаны в их названиях. Для расчета трубы, при положительной измеренной глубине расчет реализуется для потока по эксплуатационной колонне, влияние НКТ и межтрубного пространства не учитывается.

3.4.3. Задание многофазной корреляции для расчета распределения давления

Расчет распределения давления в трубе основан на многофазных корреляциях. Выбор типа корреляции определяется параметром `flow_correlation`.

В текущей версии Unifloc 7.31 VBA реализован следующий набор гидравлических корреляций:

1. `flow_correlation = 0`. Корреляция Беггса Брилла [36].
2. `flow_correlation = 1`. Корреляция Ансари [36].
3. `flow_correlation = 2`. Корреляция TUFFP Unified [5; 37].
4. `flow_correlation = 3`. Корреляция Грея, модифицированная [36].
5. `flow_correlation = 4`. Корреляция Хайгедорна Брауна [36].
6. `flow_correlation = 5`. Корреляция Сахарова Мохова [38].
7. `flow_correlation = 10`. Расчет на основе плотности газа, без учета жидкости.

Ниже на рисунке 3.8 приведены результаты расчёта кривой оттока (перепада давления в вертикальной трубе) для различных корреляций, реализованных в Unifloc 7.31 VBA.

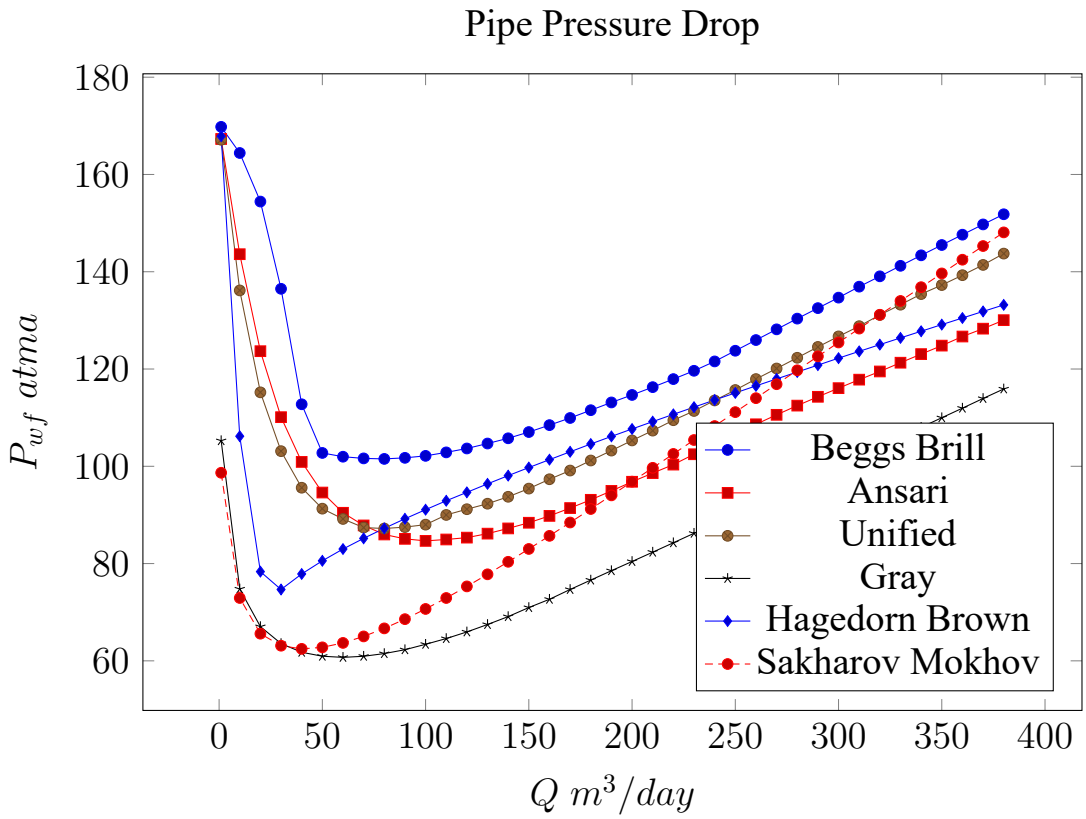


Рис. 3.8 — Кривые характеристики многофазного потока для вертикальных труб рассчитанные с использованием различных корреляций

3.4.4. MF_pipe_p_atma – функция расчета распределения давления в трубе

Функция позволяет рассчитать перепад давления в участке трубопровода. Функция обеспечивает несколько режимов расчёта. Некоторые особенности работы функции `MF_pipe_p_atma()`

- Свойства флюида в трубе определяются параметром `feed`, который в свою очередь может быть задан функцией `encode_feed()`.
- Если параметр дебита жидкости `qliq_sm3day = 0` равен нулю, расчет проводится для режима барботажа (ZNLF - zero net liquid flow) - движения газа через неподвижный столб жидкости. Расход газа должен быть задан опцией потока `q_gas_free_sm3day`. В текущей версии Unifloc 7.31 VBA расчет барботажа проводится проводится за счет переключения на механистическую корреляцию Ансари. Попытка построить график зависимости перепад давления от дебита для других корреляций может дать нелогичный результат около нулевого дебита (скачек перепада давления). Рекомендуется без необходимости для `qliq_sm3day = 0` не считать при построении графиков.
- Распределение температуры для функции расчета участка скважины определяется температурной моделью `t_model`

```
'  расчет распределения давления и температуры в трубопроводе
'  выводит результат в виде таблицы значений
Public Function MF_pipe_p_atma( _
                ByVal p_calc_from_atma, _
                ByVal t_calc_from_C, _
        Optional ByVal construction As String = "", _
        Optional ByVal feed As String = "", _
        Optional ByVal t_model As String = "", _
        Optional ByVal calc_along_coord As Boolean = True, _
        Optional ByVal flow_along_coord As Boolean = True, _
        Optional ByVal flow_correlation As Integer = 0, _
        Optional ByVal calibr_grav As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_fric As Double = 1, _
        Optional ByVal param As String, _
        Optional ByVal h_start_m As Double = -10000000000#, _
        Optional ByVal h_end_m As Double = 10000000000#)
' p_calc_from_atma  - давление с которого начинается расчет, атм
```

```
'           граничное значение для проведения расчета
' t_calc_from_C - температура в точке где задано давление расчета
' feed       - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'           функции encode_feed() или encode_feed_list()
' construction - параметры конструкции json строка. Используйте
'           функцию encode_pipe() для генерации
' t_model    - параметры температурной модели json строка.
'           Используйте функцию encode_t_model() для генерации
' calc_along_coord - направление расчета относительно координат.
' flow_along_coord - направление потока относительно координат.
' flow_correl ation - гидравлическая корреляция, номер
' calibr_grav  - калибровка на гравитационную составляющую
'                градиента давления
' calibr_fric  - калибровка на составляющую трения
'                градиента давления
' param      - дополнительные параметры расчета потока
' h_start_m - начало расчета по трубе, м
' h_end_m    - конечная точка расчета по трубе, м
' результат - число - давление на другом конце трубы atma.
'           и распределение параметров по трубе
```

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 22 — Параметры функции `MF_pipe_p_atma` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`num_value`	Номер параметра выводимого на первом месте. Позволяет подменить выводимый параметр при `show_array=0` на необходимый. Номера можно определить по расширенному выводу при `show_array=1`

При включенной опции show_array=1 результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода результата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу ”протягиванием”на несколько строк.

Таблица 23 — Расширенный вывод функции MF_pipe_p_atma

№	Параметр	Описание
0	p_result_atma	Параметр который выводится при show_array=0 или при подавлении вывода массива. Может быть настроен опцией num_value. По умолчанию расчетное давление на конце трубы
1	p_1, atma	Давление на начальном конце трубы (меньшая координата по длине), атм
2	t_1, C	Температура на начальном конце трубы (меньшая координата по длине), С
3	p_2, atma	Давление на конечном конце трубы (большая координата по длине), атм
4	t_2, C	Температура на конечном конце трубы (большая координата по длине), С
5	calibr_grav	Калибровочный коэффициент на гравитационную составляющую перепада давления
6	calibr_fric	Калибровочный коэффициент на составляющую перепада давления по трению
7	log	Лог расчета, выводится при show_log = 1

Векторные результаты перечисленные ниже могут быть использованы для построения графиков и для проверки корректности расчета.

Таблица 24 — Расширенный вывод функции `MF_pipe_p_atma`. Векторные результаты

1	`h,m`	Вектор измеренных глубин, м
2	`hvert,m`	Вектор вертикальных глубин, соответствующих измеренным, м
3	`p,atma`	Вектор давлений, соответствующих измеренным глубинам, атм
4	`t,C`	Вектор температур флюида, соответствующих измеренным глубинам, С
5	`t_amb, C`	Вектор температур окружающей среды, соответствующих измеренным глубинам, С
6	`Hl, perc`	Вектор истинных содержаний жидкости (liquid holdup), соответствующих измеренным глубинам, %
7	`fpat`	Вектор индикаторов режимов потока, соответствующих измеренным глубинам, число
8	`diam, mm`	Вектор внутренних диаметров трубы, соответствующих измеренным глубинам, мм

Режимы потока для механистических корреляций кодируются по следующей схеме при проведении расчетов

Таблица 25 — Кодировка режимов потока в функции `MF_pipe_p_atma`.

Режим	Ансари	TUFFP
liq, жидкость	100	200
gas, чистый газ	101	201
bubl, пузырьковый	102	202
slug, снарядный	103	205
dbub, распределенный пузырьковый	104	206
anul, кольцевой	105	207
int, перемежающийся	-	203
str, разделенный	-	204
na, не определен	199	299

Функция `MF_pipe_p_atma` поддерживает передачу параметров давления, температуры и свойств потока в виде списка значений. Список должен быть json

строкой кодирующей список. Числовые параметры – давление, температура могут быть закодированы функцией `encode_arange` или являться результатами расчетов других функций. Список потоков может быть закодирован функцией `encode_feed_list`. Расчет списка включается если хотя бы один из параметров передан в виде списка. В таком случае остальные параметры меняться не будут. Результаты расчета выводятся в виде словаря результатов, содержащего исходные списки с которыми проводился расчет и список рассчитанных значений коэффициента сепарации.

Таблица 26 — Вывод функции `MF_pipe_p_atma` при расчете по списку значений

№	Ключ	Описание значения
1	`p_atma`	список значений давления – результат расчета функции
2	`t_C`	список значений температуры – результат расчета функции
3	`feed`	список параметров потока использованных для проведения расчетов

Для извлечения результатов расчета из словаря можно использовать функцию `decode_json`. Для упрощенного извлечения отдельных списков подходят соответствующие функции: `decode_json_p_atma`, `decode_json_t_C`, `decode_json_q_liq_sm3day`.

3.4.5. MF_dpdl_atmm – функция расчета градиента давления по многофазной корреляции Ансари

Иногда бывает удобно/интересно посмотреть детально на результаты расчета по многофазной корреляции. Для этого можно воспользоваться данной функцией. Внимательно смотрите описание и саму функцию. Выводит ряд параметров в массиве.

```
'расчет градиента давления
'с использованием многофазных корреляций
Public Function MF_dpdl_atmm(ByVal d_m As Double, _
```

```
                ByVal p_atma As Double, _
                ByVal Ql_rc_m3day As Double, _
                ByVal Qg_rc_m3day As Double, _
      Optional ByVal mu_oil_cP As Double = const_mu_o, _
      Optional ByVal mu_gas_cP As Double = const_mu_g, _
      Optional ByVal sigma_oil_gas_Nm As Double = const_sigma_oil_Nm, _
      Optional ByVal rho_lrc_kgm3 As Double = const_go_ * 1000, _
      Optional ByVal rho_grc_kgm3 As Double = const_gg_ * const_rho_air, _
      Optional ByVal eps_m As Double = 0.0001, _
      Optional ByVal theta_deg As Double = 90, _
      Optional ByVal hcorr As Integer = 1, _
      Optional ByVal param_out As Integer = 0, _
      Optional ByVal calibr_grav As Double = 1, _
      Optional ByVal calibr_fric As Double = 1)
' расчет градиента давления по одной из корреляций
' d_m - диаметр трубы в которой идет поток
' p_atma - давление в точке расчета
' Ql_rc_m3day - дебит жидкости в рабочих условиях
' Qg_rc_m3day - дебит газа в рабочих условиях
' mu_oil_cP - вязкость нефти в рабочих условиях
' mu_gas_cP - вязкость газа в рабочих условиях
' sigma_oil_gas_Nm - поверхностное натяжение
'                    жидкость газ
' rho_lrc_kgm3 - плотность нефти
' rho_grc_kgm3 - плотность газа
' eps_m      - шероховатость
' theta_deg - угол от горизонтали
' hcorr   - тип корреляции
' param_out - параметр для вывода
' calibr_grav - калибровка гравитации
' calibr_fric - калибровка трения
```

Глава 4. Многофазный поток в пласте и призабойной зоне

4.1. Расчет многофазного потока в пласте

Для анализа работы скважины и скважинного оборудования в большинстве случаев достаточно простейшего подхода для описания производительности пласта. На текущий момент в Unifloc 7.31 VBA используется линейная индикаторная кривая с поправкой Вогеля для учета разгазирования в призабойной зоне пласта с учетом обводненности [39].

Пользовательские функции для расчета производительности пласта начинаются с префикса `IPR_`.

Для расчета притока из пласта необходимо определить связь между дебитом жидкости Q_{liq} (притоком) и забойным давлением работающей скважины P_{wf}. Линейная индикаторная кривая на основе закона Дарси задает такую связь через коэффициент продуктивности скважины, который определяется как

$$PI = \frac{Q_{liq}}{P_{res} - P_{wf}} \tag{4.1}$$

где P_{res} - пластовое давление - давление на контуре питания скважины. Закон Дарси описывает установившийся приток несжимаемой жидкости в однородном пласте.

Соответственно уравнение притока будет иметь вид

$$Q_{liq} = PI\left(P_{res} - P_{wf}\right)$$

Для линейного притока по закону Дарси коэффициент продуктивности может быть оценен либо по данным эксплуатации из уравнения 4.1 либо по аналитической зависимости по характеристикам пласта и системы заканчивания. Например для радиального притока к вертикальной скважине широко известна формула Дюпюи согласно которой

$$PI = f \cdot \frac{kh}{\mu B} \frac{1}{\ln \frac{r_e}{r_w} + S} \tag{4.2}$$

здесь f - размерный коэффициент, зависящий от выбранной системы единиц для остальных параметров. Так для системы единиц

Таблица 27 — Размерности параметров выражения 4.2

Обозначение	Параметр	СИ	Практические метрические	Американские промысловые
f	размерный коэффициент	2π	$\frac{1}{18.41}$	$\frac{1}{141.2}$
k	проницаемость	м^2	мД	mD
h	мощность пласта	м	м	ft
B	объемный коэффициент	м^3/м^3	м^3/м^3	scf/bbl
μ	вязкость	Па · с	сП	cP
r_e	радиус зоны дренирования	м	м	ft
r_w	радиус скважины	м	м	ft
S	скин фактор	безразмерный		

При снижении забойного давления добывающей скважины ниже давления насыщения, оценка дебита жидкости по закону Дарси оказывается завышенной. Газ выделяющийся в призабойной зоне пласта создает дополнительное гидравлическое сопротивление. В Unifloc 7.31 VBA поправка на снижение забойного давления ниже давления насыщения реализована на основе поправки Вогеля. Для безводной нефти по Вогелю продуктивность скважины по данным тестовой эксплуатации - дебите жидкости Q_{liq} и соответствующем забойном давлении P_{wf} может быть оценен по выражению 4.3.

$$PI = \frac{Q_{liq}}{P_{res} - P_b + \frac{P_b}{1.8}\left[1.0 - 0.2\frac{P_{wf}}{P_b} - 0.8\left(\frac{P_{wf}}{P_b}\right)^2\right]} \tag{4.3}$$

При наличии обводненности зависимость усложняется.

В Unifloc 7.31 VBA реализована модель определения коэффициента продуктивности по данным эксплуатации. Сравнение индикаторных кривых, построенных по тестовым данным $Q_{liq} = 100$ и $P_{wf} = 150$ при наличии и отсутствии воды, приведено на рисунке 4.1.

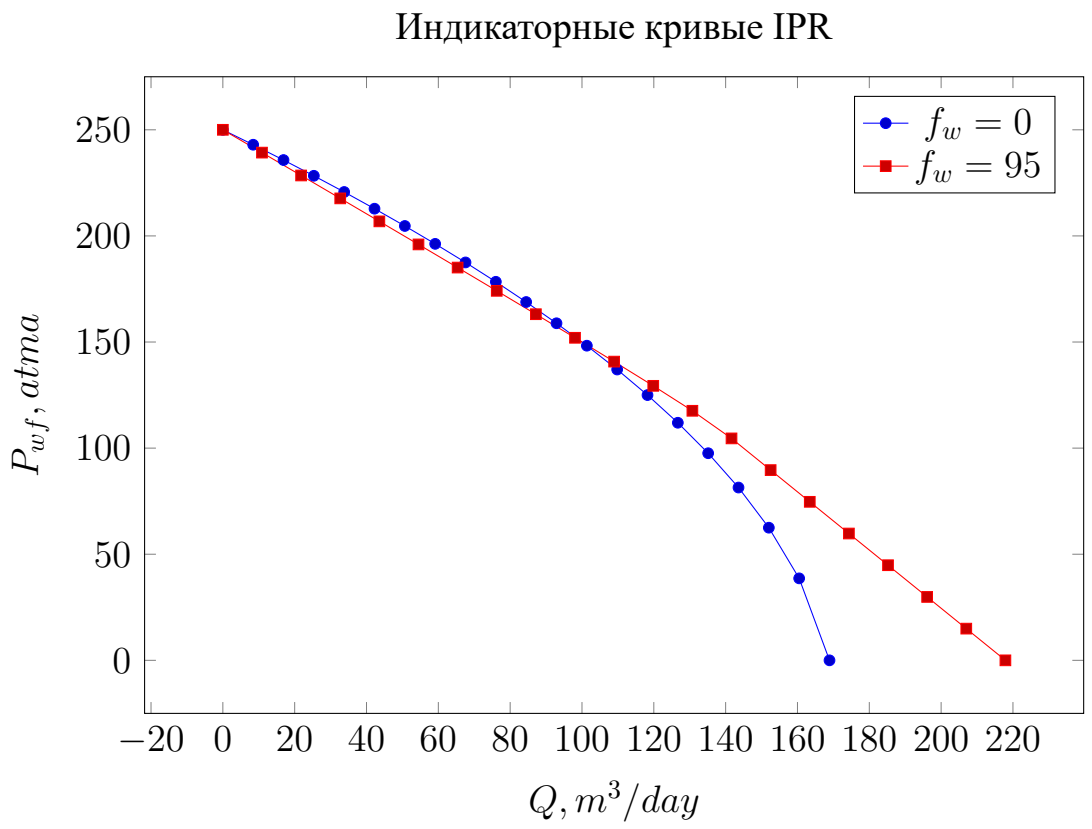


Рис. 4.1 — Сравнение индикаторных кривых для заданных тестовых параметров $Q_{liq} = 100$ и $P_{wf} = 150$ при наличии и отсутствии воды в потоке

4.1.1. IPR_pi_sm3dayatm – расчёт продуктивности

Функция позволяет рассчитать коэффициент продуктивности скважины по данным тестовой эксплуатации. Особенность линейной модели притока к скважине с поправкой Вогеля заключается в минимальном наборе исходных данных, необходимых для построения индикаторной кривой. Достаточно знать пластовое давление, дебит и забойное давление в одной точке.

```
' расчет коэффициента продуктивности пласта
' по данным тестовой эксплуатации
Public Function IPR_pi_sm3dayatm( _
                ByVal Qtest_sm3day As Double, _
                ByVal pwf_test_atma As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
```

```
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1)
' Qtest_sm3day   - тестовый дебит скважины, ст.м3/сут
' pwf_test_atma  - тестовое забойное давление, абс. атм
' p_res_atma      - пластовое давление, абс. атм
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' результат      - значение коэффициента продуктивности, ст.м3/сут/атм
```

4.1.2. IPR_p_wf_atma – расчёт забойного давления по дебиту и продуктивности

Функция позволяет рассчитать забойное давление скважины по известным значениям дебита и продуктивности.

```
' расчет забойного давления по дебиту и продуктивности
Public Function IPR_p_wf_atma( _
                ByVal pi_sm3dayatm As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
                ByVal q_liq_sm3day, _
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1, _
        Optional ByVal t_res_C As Double = 80)
' pi_sm3dayatm   - коэффициент продуктивности, ст.м3/сут/атм
' p_res_atma      - пластовое давление, абс. атм
' q_liq_sm3day    - дебит жидкости скважины на поверхности, ст.м3/сут
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' t_res_C        - температура флюида в пласте, С
' результат      - значение забойного давления, абс. атм
```

4.1.3. IPR_q_liq_sm3day – расчёт дебита по забойному давлению и продуктивности

Функция позволяет рассчитать дебит жидкости скважины на поверхности по забойному давлению и продуктивности.

```
' расчет дебита по давлению и продуктивности
Public Function IPR_q_liq_sm3day( _
                ByVal pi_sm3dayatm As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
                ByVal p_wf_atma, _
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1, _
        Optional ByVal t_res_C As Double = 80)
' pi_sm3dayatm   - коэффициент продуктивности, ст.м3/сут/атм
' p_res_atma     - пластовое давление, абс. атм
' p_wf_atma      - забойное давление, абс. атм.
'                  можно задать список [],
'                  тогда результат будет в виде списка
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' t_res_C        - температура флюида в пласте, C
' результат      - значение дебита жидкости, ст.м3/сут
'                  или список значений
```

Глава 5. Модель УЭЦН

5.1. Расчёт УЭЦН

Пользовательские функции, связанные с расчётом установок электрических центробежных насосов приведены в модуле «u7_Excel_functions_ESP». Названия функций начинаются с префикса `ESP_`.

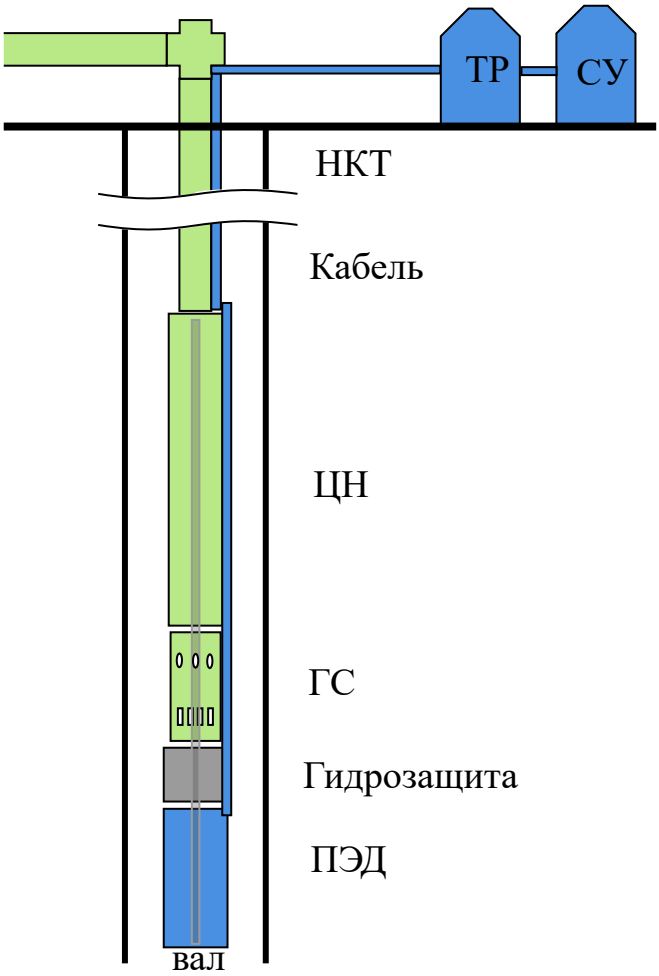


Рис. 5.1 — Схема конструктивных элементов ЭЦН

УЭЦН состоит из следующих основных конструктивных элементов:

– ЦН – центробежный насос. Модуль обеспечивающий перекачку жидкости за счёт преобразования механической энергии вращения вала в гидравлическую мощность.

- ПЭД – погружной электрический двигатель. Модуль обеспечивающий преобразование электрической энергии, поступающей по кабелю к погружному электрическому двигателю в механическую энергию вращения вала.
- ГС – газосепаратор или приёмный модуль. Модуль обеспечивающий забор пластовой жидкости из скважины и подачу ее в насос. При этом центробежный газосепаратор способен отделить часть свободного газа в потоке и направить его в межтрубное пространство скважины. Работает за счёт механической энергии вращения вала.
- вал – узел передающий энергию от погружного электрического двигателя (ПЭД) к остальным узлам установки, в том числе к центробежному насосу.
- кабель - узел передающий электрическую энергию с поверхности к погружному электрическому двигателю
- НКТ - колонна насосно компрессорных труб, на которой подвешен насос
- ТР – трансформатор – узел обеспечивающий необходимое напряжение на кабеле на поверхности. Как правило на вход трансформатора подается напряжение 380 В, а на выходе оно поднимается до нескольких тысяч вольт.
- СУ – станция управления ЭЦН. Узел управляющий работой системы УЭЦН. Может запускать и останавливать скважины, обеспечивает защиту установки ЭЦН при нежелательных режимах работы
- ЧРП – частотно регулируемый привод. Обычно комплектуется со станцией управления УЭЦН. Обеспечивает изменение частоты колебаний напряжения и тока, а соответственно и частоты вращения вала ЭЦН. Может отсутствовать в компоновке УЭЦН.

Элементы показаны на рисунке 5.1 где гидравлическая часть и электрическая обозначены разными цветами.

В промысловых сводках и отчётах часто ЭЦН обозначаются с использованием значений габарита насоса, номинальной подачи и номинального напора. ЭЦН5А 50 - 2000, означает что, это насос 5А габарита, с номинальной подачей 50 м3/сут и напором 2000 м.

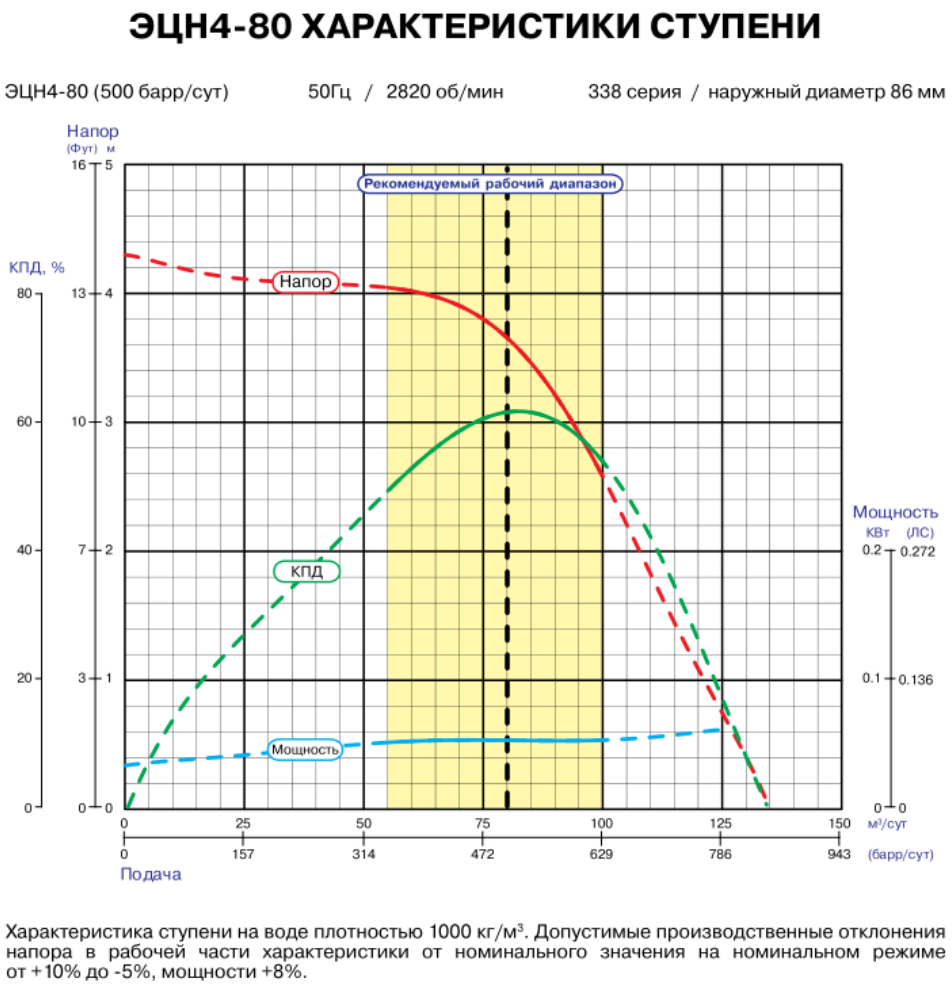


Рис. 5.2 — Пример каталожных характеристик ЭЦН

УЭЦН, как и другие центробежные машины, обладает относительно узким диапазоном подач при которых достигается достаточно высокий КПД его работы (от 30 до 60%). В связи с этим для различных подач выпускаются различные типы УЭЦН. Всего в промышленности используются сотни различных типов ЭЦН различных производителей. Характеристики различных насосов предоставляются производителями в каталогах оборудования и обычно встраиваются в расчётные программы в виде баз данных характеристик оборудования. В надстройке Unifloc 7.31 VBA содержится база данных характеристик ЭЦН, которая может быть использована при проведении расчетов пользовательскими функциями. База сокращенная, содержит ряд насосов только одного производителя. Как правило этого достаточно для проведения базовых расчетов, так как характеристики насосов одного типоразмера разных производителей схожи между собой.

Для выбора определённого насоса из базы необходимо использовать его идентификатор в базе - `pump_id`

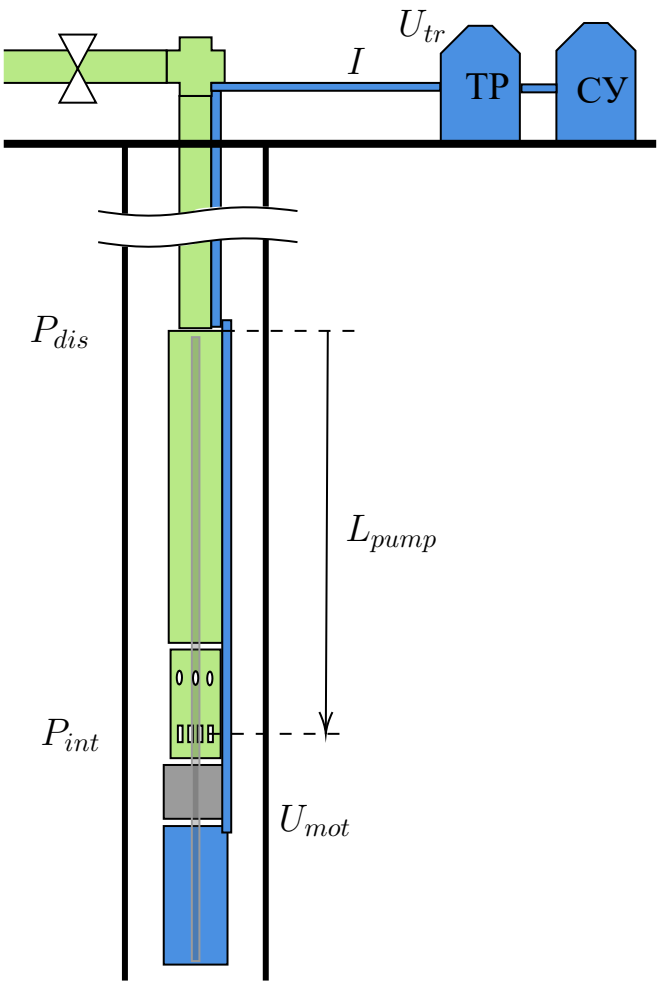


Рис. 5.3 — Схема конструктивных элементов ЭЦН

Задача расчёта УЭЦН обычно сводится к расчёту гидравлических и электрических характеристик ЭЦН, ключевые из которых показанных на рисунке 5.3. Выделяют несколько режимов расчёта:

– Прямая задача - по заданным значениям дебита жидкости скважины, давлению на приеме, напряжению питания УЭЦН на поверхности найти давление на выкиде насоса, потребляемую электрическую мощность, потребляемый ток установки, КПД всей системы и отдельных узлов системы
– Обратная задача - по данным контроля параметров работы УЭЦН на поверхности - потребляемому току, напряжению питания частоте подаваемого напряжения, данным по конструкции УЭЦН и скважины найти дебит жидкости и обводнённость по скважине, давление на приёме и забойное давление.

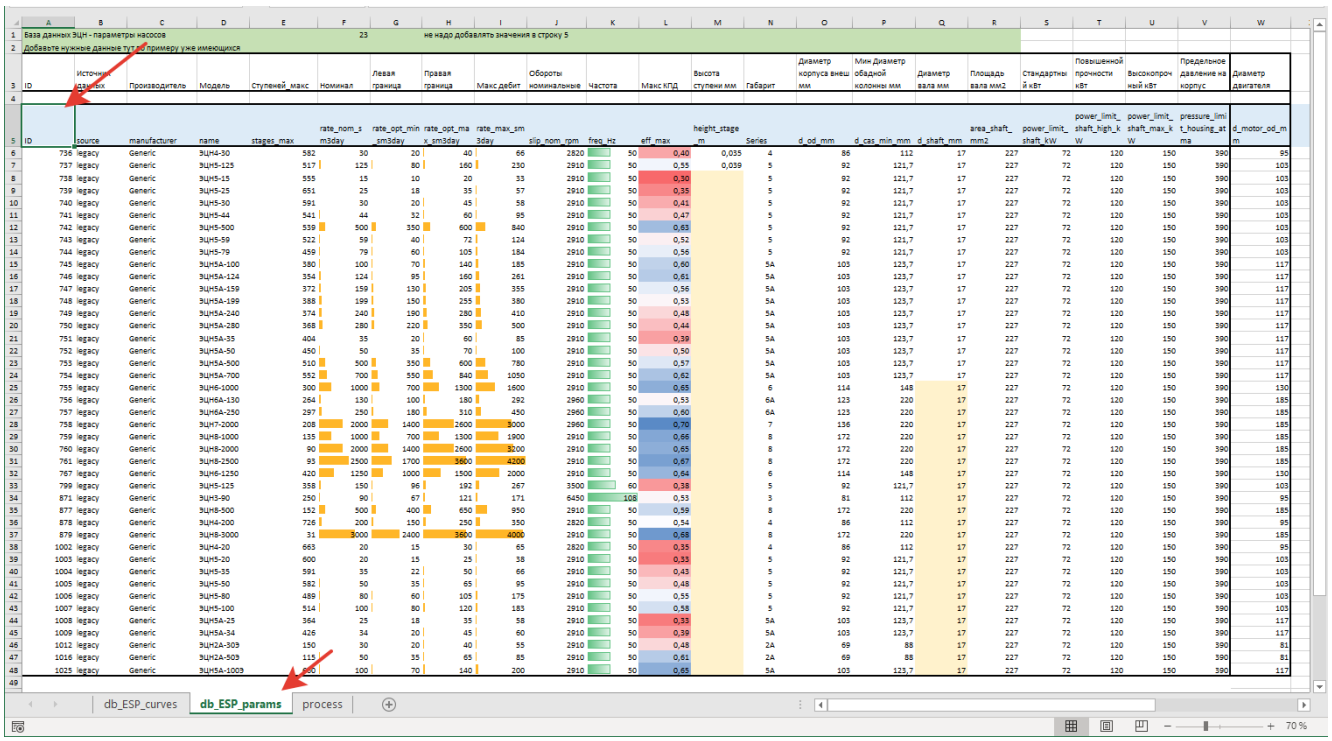
– Задача узлового анализа - по данным конструкции скважины, параметров работы погружного оборудования оценить дебит по жидкости скважины при заданным параметрах работы УЭЦН или при их изменении. К этому типу задач относится задача подбора погружного оборудования для достижения заданных условий эксплуатации

Для расчёта УЭЦН требуется рассчитать гидравлические параметры работы ЦН и электромеханические параметры ПЭД.

Более подробно про УЭЦН можно прочитать в книге Gabor Tacacs Electrical Submersible Pumps Manual [40].

5.1.1. База характеристик ЭЦН

Для расчёта параметров работы УЭЦН необходимо иметь возможность работы с фактическими расходно напорными характеристиками различных типов ЭЦН. Такая возможность обеспечивается за счет наличия в составе Unifloc 7.31 VBA базы характеристик ЭЦН, которая находится в файле `ESP_json.db`. Файл базы должен находиться рядом с надстройкой, название нельзя менять, оно жестко зашито в коде (актуально для версии 7.25). Файл базы данных текстовый в формате json. Что обеспечивает достаточно простую работу с ним и потенциальную возможность внесения новых типов оборудования без привлечения внешних инструментов. Тем не менее в папке `db/` репозитория можно найти вариант базы данных в формате Excel `ESP_db.xlsm` с возможностью генерации json базы.



База данных ЭЦН - параметры насосов 23 не надо добавлять значения в строку 5

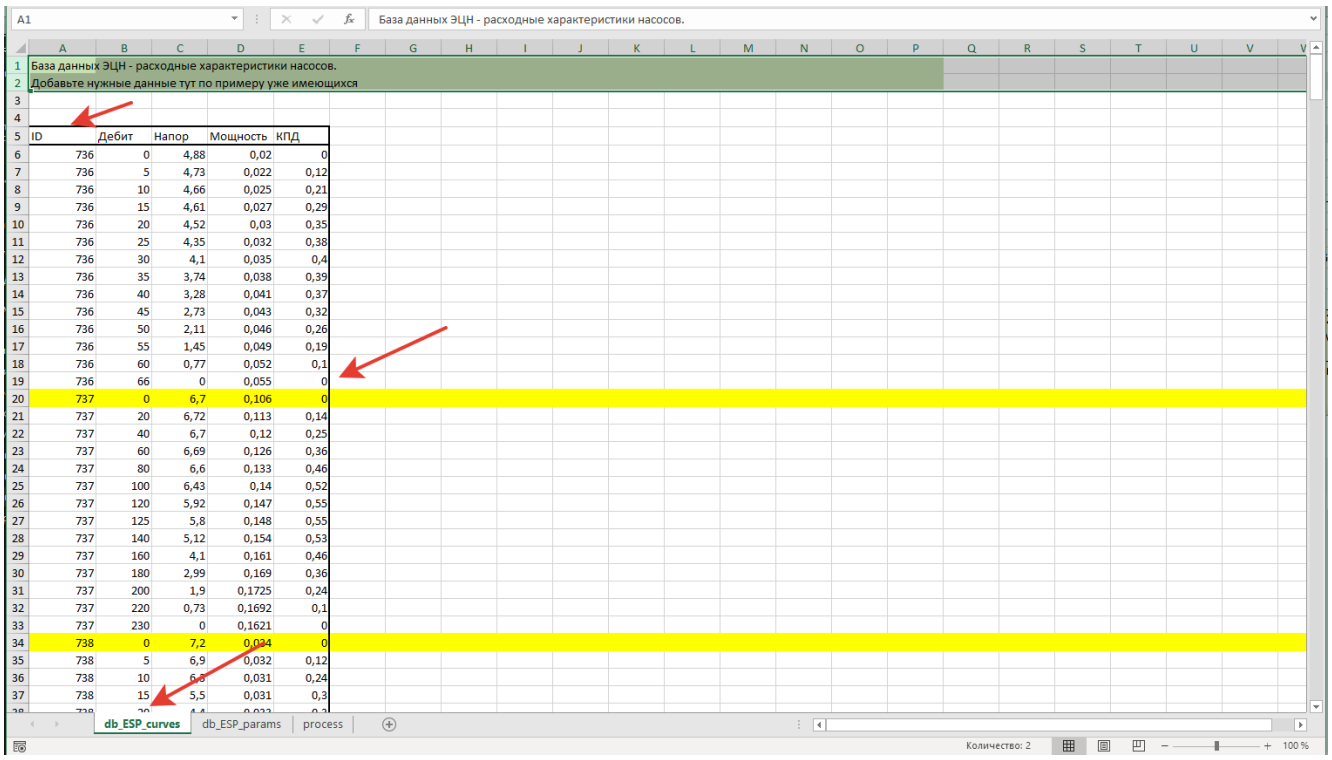
Добавьте нужные данные тут по примеру уже имеющихся

ID	Источник данных	Производитель	Модель	Ступеней_макс	Номинал	Левая граница	Правая граница	Макс дебит	Обороты номинальные	Частота	Макс КПД	Высота ступени мм	Габарит	Диаметр корпуса внеш мм	Мин Диаметр обадной колонны мм	Диаметр вала мм	Площадь вала мм2	Стандартный кВт	Повышенной прочности кВт	Высокопрочный кВт	Предельное давление на корпус	Диаметр двигателя
ID	source	manufacturer	name	stages_max	rate_nom_sm3day	rate_opt_min_sm3day	rate_opt_max_sm3day	rate_max_sm3day	slip_nom_rpm	freq_Hz	eff_max	height_stage_m	Series	d_od_mm	d_cas_min_mm	d_shaft_mm	area_shaft_mm2	power_limit_shaft_kW	power_limit_shaft_high_kW	power_limit_shaft_max_kW	pressure_limit_housing_atma	d_motor_od_mm
736	legacy	Generic	ЭЦН4-30	582	30	20	40	66	2820	50	0,40	0,035	4	86	112	17	227	72	120	150	390	95
737	legacy	Generic	ЭЦН5-125	517	125	80	160	230	2910	50	0,55	0,039	5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
738	legacy	Generic	ЭЦН5-15	555	15	10	20	33	2910	50	0,30		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
739	legacy	Generic	ЭЦН5-25	651	25	18	35	57	2910	50	0,35		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
740	legacy	Generic	ЭЦН5-30	591	30	20	45	58	2910	50	0,41		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
741	legacy	Generic	ЭЦН5-44	541	44	32	60	95	2910	50	0,47		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
742	legacy	Generic	ЭЦН5-500	539	500	350	600	840	2910	50	0,63		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
743	legacy	Generic	ЭЦН5-59	522	59	40	72	124	2910	50	0,52		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
744	legacy	Generic	ЭЦН5-79	459	79	60	105	184	2910	50	0,56		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
745	legacy	Generic	ЭЦН5А-100	380	100	70	140	185	2910	50	0,60		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
746	legacy	Generic	ЭЦН5А-124	354	124	95	160	261	2910	50	0,61		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
747	legacy	Generic	ЭЦН5А-159	372	159	130	205	355	2910	50	0,56		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
748	legacy	Generic	ЭЦН5А-199	388	199	150	255	380	2910	50	0,53		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
749	legacy	Generic	ЭЦН5А-240	374	240	190	280	410	2910	50	0,48		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
750	legacy	Generic	ЭЦН5А-280	368	280	220	350	500	2910	50	0,44		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
751	legacy	Generic	ЭЦН5А-35	404	35	20	60	85	2910	50	0,39		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
752	legacy	Generic	ЭЦН5А-50	450	50	35	70	100	2910	50	0,50		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
753	legacy	Generic	ЭЦН5А-500	510	500	350	600	780	2910	50	0,57		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
754	legacy	Generic	ЭЦН5А-700	552	700	550	840	1050	2910	50	0,62		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
755	legacy	Generic	ЭЦН6-1000	300	1000	700	1300	1600	2910	50	0,65		6	114	148	17	227	72	120	150	390	130
756	legacy	Generic	ЭЦН6А-130	264	130	100	180	292	2960	50	0,53		6А	123	220	17	227	72	120	150	390	185
757	legacy	Generic	ЭЦН6А-250	297	250	180	310	450	2960	50	0,60		6А	123	220	17	227	72	120	150	390	185
758	legacy	Generic	ЭЦН7-2000	208	2000	1400	2600	3000	2960	50	0,70		7	136	220	17	227	72	120	150	390	185
759	legacy	Generic	ЭЦН8-1000	135	1000	700	1300	1900	2910	50	0,66		8	172	220	17	227	72	120	150	390	185
760	legacy	Generic	ЭЦН8-2000	90	2000	1400	2600	3200	2910	50	0,65		8	172	220	17	227	72	120	150	390	185
761	legacy	Generic	ЭЦН8-2500	93	2500	1700	3600	4200	2910	50	0,67		8	172	220	17	227	72	120	150	390	185
767	legacy	Generic	ЭЦН6-1250	420	1250	1000	1500	2000	2910	50	0,64		6	114	148	17	227	72	120	150	390	130
799	legacy	Generic	ЭЦН5-125	358	150	96	192	267	3500	60	0,38		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
871	legacy	Generic	ЭЦН3-90	250	90	67	121	171	6450	108	0,53		3	81	112	17	227	72	120	150	390	95
877	legacy	Generic	ЭЦН8-500	152	500	400	650	950	2910	50	0,59		8	172	220	17	227	72	120	150	390	185
878	legacy	Generic	ЭЦН4-200	726	200	150	250	350	2820	50	0,54		4	86	112	17	227	72	120	150	390	95
879	legacy	Generic	ЭЦН8-3000	31	3000	2400	3600	4000	2910	50	0,68		8	172	220	17	227	72	120	150	390	185
1002	legacy	Generic	ЭЦН4-20	663	20	15	30	65	2820	50	0,35		4	86	112	17	227	72	120	150	390	95
1003	legacy	Generic	ЭЦН5-20	600	20	15	25	38	2910	50	0,33		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
1004	legacy	Generic	ЭЦН5-35	591	35	22	50	66	2910	50	0,43		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
1005	legacy	Generic	ЭЦН5-50	582	50	35	65	95	2910	50	0,48		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
1006	legacy	Generic	ЭЦН5-80	489	80	60	105	175	2910	50	0,55		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
1007	legacy	Generic	ЭЦН5-100	514	100	80	120	185	2910	50	0,55		5	92	121,7	17	227	72	120	150	390	103
1008	legacy	Generic	ЭЦН5А-25	364	25	18	35	58	2910	50	0,33		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
1009	legacy	Generic	ЭЦН5А-34	426	34	20	45	60	2910	50	0,39		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117
1012	legacy	Generic	ЭЦН2А-303	150	30	20	40	55	2910	50	0,48		2А	69	88	17	227	72	120	150	390	81
1016	legacy	Generic	ЭЦН2А-503	115	50	35	65	85	2910	50	0,61		2А	69	88	17	227	72	120	150	390	81
1025	legacy	Generic	ЭЦН5А-1003	100	100	70	140	200	2910	50	0,65		5А	103	123,7	17	227	72	120	150	390	117

db_ESP_curves | db_ESP_params | process

Рис. 5.4 — лист db_ESP_params файла с базой ЭЦН

Файл ESP_db.xlsm не зависит от надстройки Unifloc 7.31 VBA и может работать самостоятельно. База, фактически, состоит из двух таблиц на листах db_ESP_params (смотри рисунок 5.4) и db_ESP_curves (смотри рисунок 5.5). Первая хранит параметры ЭЦН, вторая кривые расходно напорных характеристик. Таблицы связаны по идентификатору насоса ID. Для добавления нового насоса следует добавить строку в таблицу на листе db_ESP_params с соответствующими параметрами (все поля обязательны к заполнению) и добавить строки в таблицу db_ESP_curves с тем же идентификатором ID и значениями кривых РНХ (не менее 5 точек должно быть задано). При проведении расчётов кривые РНХ будут проинтерполированы кубическими сплайнами.



База данных ЭЦН - расходные характеристики насосов.
Добавьте нужные данные тут по примеру уже имеющихся

ID	Дебит	Напор	Мощность	КПД
736	0	4,88	0,02	0
736	5	4,73	0,022	0,12
736	10	4,66	0,025	0,21
736	15	4,61	0,027	0,29
736	20	4,52	0,03	0,35
736	25	4,35	0,032	0,38
736	30	4,1	0,035	0,4
736	35	3,74	0,038	0,39
736	40	3,28	0,041	0,37
736	45	2,73	0,043	0,32
736	50	2,11	0,046	0,26
736	55	1,45	0,049	0,19
736	60	0,77	0,052	0,1
736	66	0	0,055	0
737	0	6,7	0,106	0
737	20	6,72	0,113	0,14
737	40	6,7	0,12	0,25
737	60	6,69	0,126	0,36
737	80	6,6	0,133	0,46
737	100	6,43	0,14	0,52
737	120	5,92	0,147	0,55
737	125	5,8	0,148	0,55
737	140	5,12	0,154	0,53
737	160	4,1	0,161	0,46
737	180	2,99	0,169	0,36
737	200	1,9	0,1725	0,24
737	220	0,73	0,1692	0,1
737	230	0	0,1621	0
738	0	7,2	0,034	0
738	5	6,9	0,032	0,12
738	10	6,3	0,031	0,24
738	15	5,5	0,031	0,3

Рис. 5.5 — лист db_ESP_curves файла с базой ЭЦН

Заголовки строки 5 на листе db_ESP_params (смотри рисунок 5.6) определяют ключи параметров в json файле. Их нельзя менять, так как при считывании они жёстко зашиты в коде. Если в таблицу добавить столбец с новым названием, то он тоже будет записан в json файл, но не будет учитываться в расчётах без соответствующих модификаций в коде. Строка 4 должна быть пустой для корректной работы макроса (при считывании выделяется заполненная область вокруг левого верхнего угла таблицы - ячейки с названием db_ESP_params_topleft).

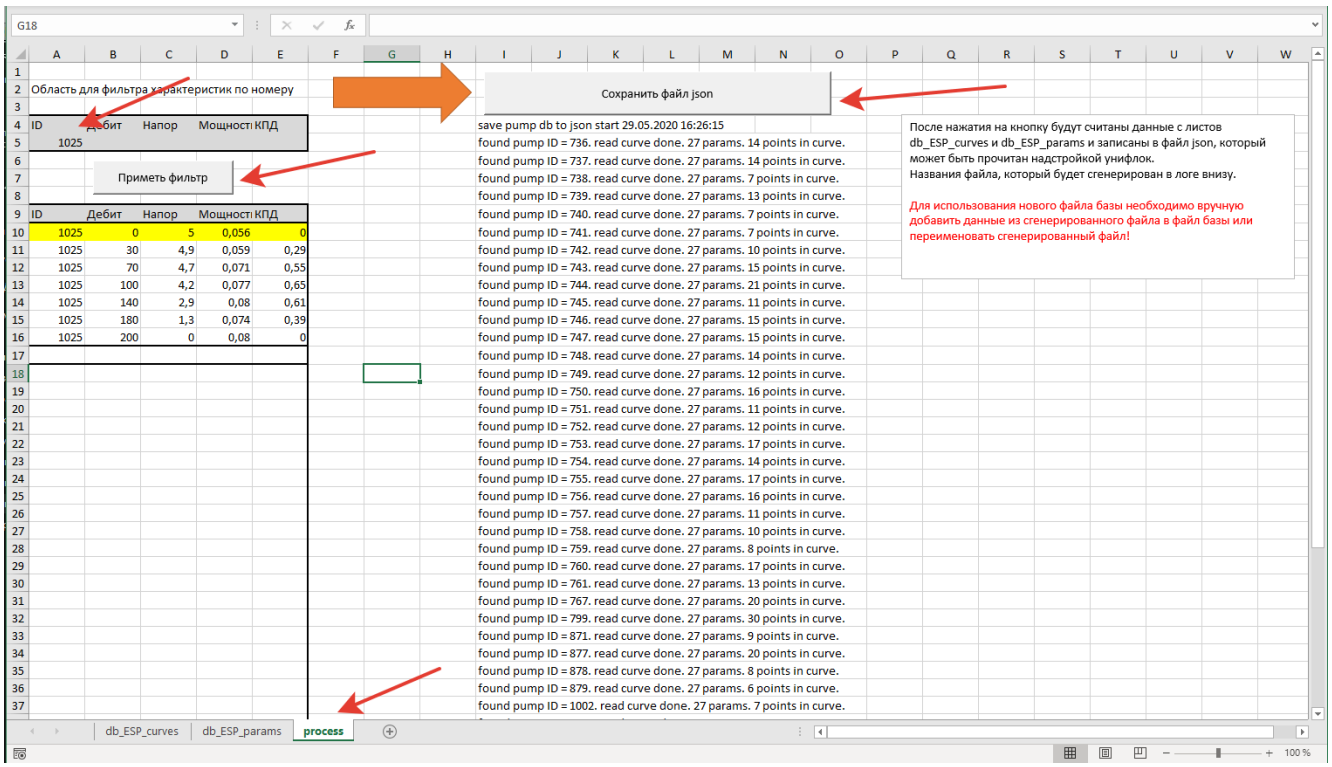


Рис. 5.6 — лист `process` файла с базой ЭЦН

На листе `process` таблицы есть возможность извлечь из базы расходно напорные характеристики одного насоса, а также сохранить файл в формате json. Для использования сгенерированного файла в Unifloc 7.31 VBA его потребуется вручную переименовать и переместить в папку с надстройкой Unifloc 7.31 VBA.

5.1.2. ESP_head_m – расчёт номинального напора ЭЦН

Функция позволяет получить паспортные характеристики ЭЦН. Возвращает значение напора при определённой подаче. При указанном значении вязкости нефти пересчитывает паспортные характеристики с учётом вязкости.

```
' номинальный напор ЭЦН (на основе каталога ЭЦН)
' учитывается поправка на вязкость и калибровки
Public Function ESP_head_m( _
        ByVal qliq_m3day As Double, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal pump_id As Long, _
```

```
        Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1)
' qliq_m3day - дебит жидкости в условиях насоса (стенд)
' num_stages  - количество ступеней
' freq_Hz     - частота вращения насоса
' pump_id     - номер насоса в базе данных
' mu_cSt      - вязкость жидкости, сСт;
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
```

Расчёт выполняется на основе паспортных характеристик ЦН из каталога встроенного в надстройку Unifloc 7.31 VBA. Паспортные характеристики расширены для дебитов превышающих максимальный при котором насос способен развивать положительный напор. Для больших дебитов напор становится отрицательным, то есть насос становится гидравлическим сопротивлением, хотя и продолжает отбирать мощность с вала.

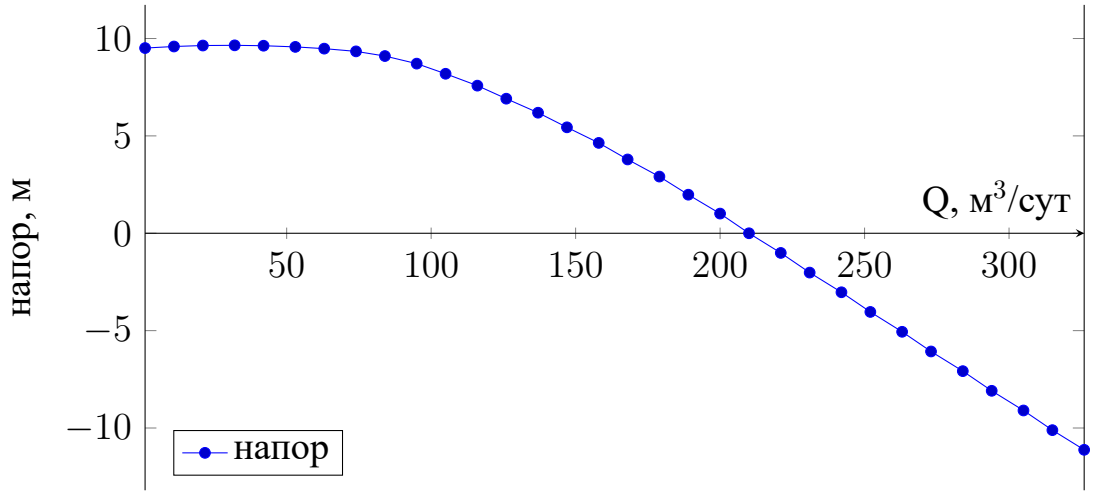


Рис. 5.7 — Номинальная характеристика центробежного насоса ЭЦН-80 на частоте 60 Гц

5.1.3. ESP_eff_fr – расчёт номинального КПД ЭЦН

Функция позволяет получить паспортные характеристики ЭЦН. Возвращает значение КПД насоса при определённой подаче. При указанном значении вязкости нефти пересчитывает паспортные характеристики с учётом вязкости.

```
' номинальный КПД ЭЦН (на основе каталога ЭЦН)
' учитывается поправка на вязкость
Public Function ESP_eff_fr( _
        ByVal qliq_m3day As Double, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal pump_id As Long = 737, _
        Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1)
' qliq_m3day - дебит жидкости в условиях насоса (стенд)
' num_stages  - количество ступеней
' freq_Hz    - частота вращения насоса
' pump_id    - номер насоса в базе данных
' mu_cSt     - вязкость жидкости, сСт;
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
```

Расчёт выполняется на основе паспортных характеристик ЦН из каталога встроенного в надстройку Unifloc 7.31 VBA. Паспортные характеристики расширены для дебитов превышающих максимальный при котором насос способен развивать положительный напор. Для больших дебитов напор становится отрицательным, а КПД обнуляется.

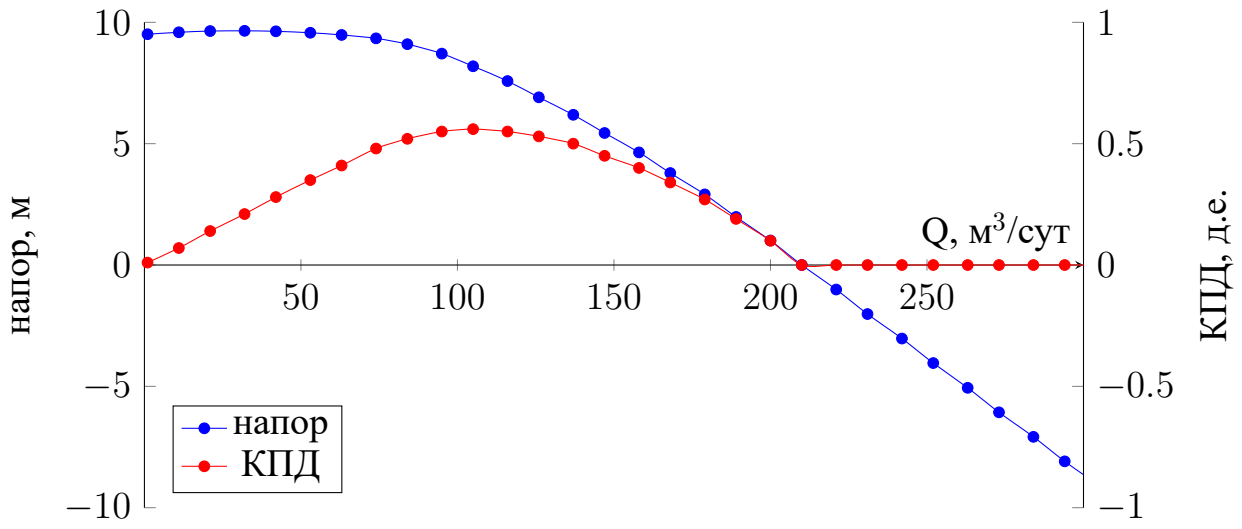


Рис. 5.8 — Номинальная характеристика центробежного насоса ЭЦН-80 на частоте 60 Гц

5.1.4. ESP_power_W – расчёт номинальной мощности потребляемой ЭЦН

Функция позволяет получить паспортные характеристики ЭЦН. Возвращает значение потребляемой с вала механической мощности при определённой подаче. При указанном значении вязкости нефти пересчитывает паспортные характеристики с учётом вязкости.

```
' номинальная мощность потребляемая ЭЦН с вала (на основе каталога ЭЦН)
' учитывается поправка на вязкость
Public Function ESP_power_W( _
        ByVal qliq_m3day As Double, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal pump_id As Long = 737, _
        Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1)
' qliq_m3day - дебит жидкости в условиях насоса (стенд)
' num_stages  - количество ступеней
' freq_Hz    - частота вращения насоса
```

```
' pump_id     - номер насоса в базе данных
' mu_cSt      - вязкость жидкости, сСт;
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
```

Расчёт выполняется на основе паспортных характеристик ЦН из каталога встроенного в надстройку Unifloc 7.31 VBA. Паспортные характеристики расширены для дебитов превышающих максимальный при котором насос способен развивать положительный напор. Для больших дебитов напор становится отрицательным, а потребляемая мощность остается постоянной равной мощности при нулевом напоре (что неверно и наверное когда то будет улучшено).

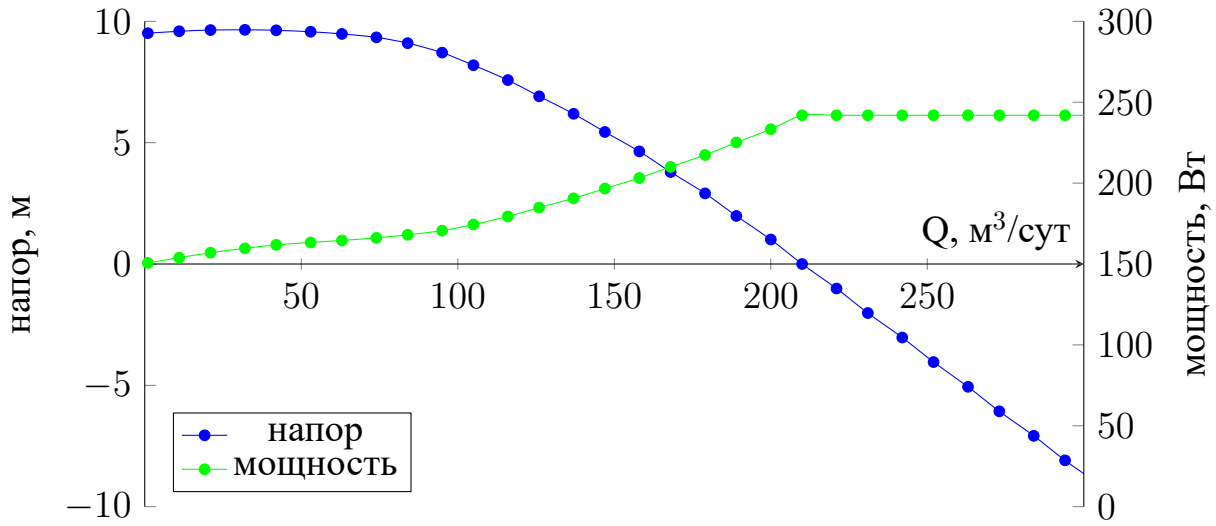


Рис. 5.9 — Номинальная характеристика центробежного насоса ЭЦН-80 на частоте 60 Гц

5.1.5. ESP_id_by_rate – выбор типового насоса по номинальному дебиту

Функция возвращает идентификатор типового насоса по заданному номинальному дебиту. Может быть использована для выбора насоса на основе его наименования типа ЭЦН 50 - 2000.

```
' функция возвращает идентификатор типового насоса по значению
' номинального дебита
Public Function ESP_id_by_rate(q As Double)
' возвращает ID в зависимости от номинального дебита.
' насосы подобраны вручную из текущей базы.
' Q - номинальный дебит
```

5.1.6. ESP_p_atma – расчёт распределения давления в ЭЦН

Функция рассчитывает перепад давления, развиваемый ЦН при заданных параметрах флюида и термобарических условиях. Это одна из основных функция расчёта ЭЦН, комбинирующая характеристики из каталога и гидравлическую модель работы ЭЦН.

$$P_{dis} = P_{int} + \sum_{i}^{n} \rho_{mix,rc}(\bar{P}_{st,i},T) \cdot g \cdot h_{st,i}(Q_{mix,i}(\bar{P}_{st,i},T))$$

где

P_{dis}	давление на выкиде насоса;
P_{int}	давление на приёме насоса;
i	номер ступени, или набора ступеней для ускоренного расчёта;
n	количество ступеней или наборов ступеней;
$\bar{P}_{st,i}$	среднее давление на ступени i;
$\rho_{mix,rc}$	плотность ГЖС в ступени i ;
$h_{st,i}$	напор развиваемый в ступени i;
$Q_{mix,i}$	расход ГЖС в ступени i;
g	ускорение свободного падения;

При расчёте сделаны следующие предположения:

– не учитывается проскальзывание для асинхронного двигателя. Несмотря на то, что в базе может быть задана частота вращения с учётом проскальзывания, в этой функции считается, что $slip = 0$ и ЦН вращается с частотой вращения электрического поля заданного параметром `freq_Hz`. Для учета проскальзывания следует использовать функцию `ESP_system_calc` или скорректировать частоту `freq_Hz` вручную.

– в расчёте предполагается, что при повышении давления свободный газ растворится в нефти в соответствии с заданными PVT параметрами. Фактически работает опция - свободный газ растворяется. Для того, чтобы реализовать вариант расчёта при котором свободный газ при повышении давления не успеет раствориться в нефти следует модифицировать свойства флюида поступающего в насос так, чтобы запретить его растворение больше определённого предела (изменить давление насыщения P_b и газосодержание при давлении насыщения r_{sb})
– возможен как расчёт давления на выкиде по давлению на приёме, так и расчёт давления на приёме по давлению на выкиде (регулируется параметром `calc_along_flow`). При этом расчёт ведётся непосредственным интегрированием по ступеням ЭЦН с шагом `dnum_stages_integrate`, задаваемым как опция для `param`. Расчёт против потока, при котором по давлению на выкиде рассчитывается давление на приёме следует применять с осторожностью. В этом варианте не сработают поправки на влияние газа, так как они предполагаю расчёт величины поправки от доли газа на приёме, которая не известна при старте расчёта. Кроме того при большом шаге интегрирования `dnum_stages_integrate`) может накапливаться ошибка влияния газа при низких давлениях. Более надёжным вариантом расчёта давления на приёме по известному давлению на выкиде будет итеративный расчёт (подбор такого давления на приёме при котором будет обеспечиваться заданное давление на выкиде)
– температурный расчёт ЭЦН - расчёт температуры флюида на выкиде насоса - возможен только для варианта расчёта от давления на приёме к давлению на выкиде `calc_along_flow=True`). При этом не учитывается эмиссия тепла в окружающее пространство от корпуса насоса. Предполагается, что все выделившееся тепло идёт на нагрев флюида. Температурный расчет активируется если `t_dis_C` задано отрицательным, иначе температура по ступеням линейно интерполируется между заданными значениями.

```
'функция расчета давления на выходе/входе ЭЦН в рабочих условиях
'большинство параметров задается явно
Public Function ESP_p_atma( _
                 ByVal p_calc_atma, _
        Optional ByVal t_intake_C = 50, _
```

```
        Optional ByVal t_dis_C = 50, _
        Optional ByVal feed As String = "", _
        Optional ByVal pump_id As Long, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1, _
        Optional ByVal gas_correct_model As Integer = 0, _
        Optional ByVal gas_correct_stage_by_stage As Integer = 0, _
        Optional ByVal param As String)
' p_calc_atma      - давление для которого делается расчет
'                    либо давление на приеме насоса
'                    либо давление на выкиде насоса
'                    определяется параметром calc_along_flow
' t_intake_C       - температура на приеме насоса
' t_dis_C          - температура на выкиде насоса.
'             если = 0 и calc_along_flow = 1 то рассчитывается
' feed     - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'            функцию encode_feed() для генерации
' pump_id          - идентификатор насоса
' num_stages       - количество ступеней
' freq_Hz          - частота вращения вала ЭЦН, Гц
' calc_along_flow  - режим расчета снизу вверх или сверху вниз
'          calc_along_flow = True => p_atma давление на приеме
'          calc_along_flow = False => p_atma давление на выкиде
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
' gas_correct_model - модель калибровки по газу
' gas_correct_stage_by_stage - модель применятеся
'                     для всех ступеней по отдельности
' param     - дополнительные параметры расчета потока
' результат   - массив значений включающий
```

Часть настроек управляющая выводом результатов задается в виде закодированной строки в аргументе `param`.

Таблица 28 — Параметры функции `ESP_p_atma` передаваемые через аргумент – `param`

Ключ	Описание
`show_array`	Показывать расширенные результаты расчета: 0 – результат в виде одного числа (значение по умолчанию), 1 – результат в виде массива.
`show_log`	Показывать лог расчета в выводе. 0 – лог выводиться не будет, 1 – будет показан лог в виде json строки в массиве вывода. Большой размер лога может вызвать проблемы на некоторых версиях Excel.
`num_value`	Номер параметра выводимого на первом месте. Позволяет подменить выводимый параметр при `show_array=0` на необходимый. Номера можно определить по расширенному выводу при `show_array=1`
`dnum_stages_integrate`	Шаг интегрирования по ступеням. По умолчанию для ускорения расчет равен `dnum_stages_integrate=10`. Установка `dnum_stages_integrate=1` должно улучшить точность расчета
`out_points`	Количество точек для вывода векторных результатов. По умолчанию `out_points = 20`

При включенной опции `show_array=1` результат выдается в виде двумерного массива значений - плоской таблицы. Результирующая таблица может быть непосредственно выведена в ячейки Excel (в версиях не поддерживающие динамические массивы необходимо использовать Cntrl-Shift-Enter для вывода результата в заранее выделенный диапазон ячеек) или получена в виде массива при вызове из VBA.

При выводе массива на лист Excel первая строка содержит значения параметров, вторая подписи к значениям. При выводе с использованием Cntrl-Shift-Enter можно вывести только первую строку параметров и распространить расчетную формулу ”протягиванием”на несколько строк.

Таблица 29 — Расширенный вывод функции `ESP_p_atma`

№	Параметр	Описание
0	`p_dis_atma`	Параметр который выводится при `show_array=0` или при подавлении вывода массива. Может быть настроен опцией `num_value`. По умолчанию давление на выкиде ЭЦН.
1	`p_int_atma`	Давление на приеме насоса, атм
2	`t_int_C`	Температура на приеме насоса, С
3	`p_dis_atma`	Давление на выкиде насоса, атм
4	`t_dis_C`	Температура на выкиде насоса, С
5	`head_m`	Фактические напор развиваемый насосом, м
6	`eff_ESP_d`	Фактический гидравлический КПД насоса, проценты
7	`power_fluid_W`	Фактическая гидравлическая мощность развиваемая насосом, Вт
8	`power_ESP_W`	Фактическая потребляемая с вала механическая мощность насоса, Вт
9	`gas_correction`	Поправке на газ
10	`log`	Лог расчета, выводится при `show_log = 1`

Векторные результаты перечисленные ниже могут быть использованы для построения графиков и для проверки корректности расчета.

Таблица 30 — Расширенный вывод функции `ESP_p_atma`. Векторные результаты

1	`n_stage`	Вектор номеров ступеней
2	`length_m`	Вектор координат ступеней (длина), м
3	`p,atma`	Вектор давлений, соответствующих заданным ступеням, атм
4	`t,C`	Вектор температур флюида, соответствующих заданным ступеням, С
5	`gas_fraction`	Вектор расходных долей газа в потоке, соответствующих заданным ступеням, проценты
6	`qmix_rm3day`	Вектор объемных расходов газожидкостной смеси, соответствующих заданным ступеням, м3/сут
7	`power_fluid_W`	Вектор значений фактической гидравлической мощности для ступеней ниже заданной, Вт
8	`power_ESP_W`	Вектор значений фактической потребляемой с вала механическая мощности для ступеней ниже заданной, Вт
9	`eff fluid`	Вектор значений КПД для заданной ступени, проценты
10	`mu_stage_cP`	Вектор значений вязкости на заданной ступени
11	`gas correction`	Вектор значений поправки на влияние газа по ступеням

Глава 6. Старые функция расчёта технологического режима добывающих скважин

6.1. Технологический режим добывающих скважин

Одна из первых реализаций расчётных модулей Unifloc 7.31 VBA была создана для проведения расчётов потенциала добычи нефти в форме технологического режима добывающих скважин. Расчёты были реализованы в начале 2000х годов. Расчётная форма оказалась удобной для практического применения и со временем алгоритмы расчёта распространились по разным компаниям и широко использовались.

Функции расчета параметров технологического режима добывающих скважин находятся в модуле `u_old_mdlTecRegimes`

Для обеспечения обратной совместимости расчётов в Unifloc 7.31 VBA заложены основные функции расчёта из технологического режима работы скважин. У функций изменены названия функций и имена аргументов, однако алгоритмы расчётов оставлены без изменений.

Пользовательские функции для расчета параметров технологического режима работы добывающих скважин начинаются с префикса `old_`. Листинги определений функций в описании не приводятся, кому интересно, лучше искать непосредственно в коде.

6.1.1. old_pwf_calc_atma – расчёт забойного давления по динамическому уровню

Функция рассчитывает забойное давление добывающей нефтяной скважины. Расчёт выполняется по известному значению затрубного давления и динамическому уровню. [1]

Результат расчёта - абсолютное значение забойного давления.

Расчёт выполняется по модифицированной корреляции Хасана-Кабира оптимизированной для скорости вычисления как для интервала выше насоса в межтрубном пространстве, так и для участка ниже насоса. При расчёте пренебрегается трением в потоке и используются упрощённые PVT зависимости, что позволило получить результат в аналитическом виде и ускорить расчёты. [ссылку надо будет привести когда то]

Функция позволяет учесть удлинения скважин для забоя, глубины спуска насоса, и динамического уровня. Два последних значения являются опциональными и могут быть опущены при проведении расчёта.

6.1.2. old_pwf_calc_p_intake_atma – расчёт забойного давления по давлению на приеме

Функция рассчитывает забойное давление добывающей нефтяной скважины по известному значению давления на приёме насоса.

Результат расчёта - абсолютное значение забойного давления.

Расчёт выполняется по модифицированной корреляции Хасана-Кабира оптимизированной для скорости вычисления для участка ниже насоса. При расчёте пренебрегается трением в потоке и используются упрощённые PVT зависимости, что позволило получить результат в аналитическом виде и ускорить расчёты. [ссылку надо будет привести когда то]

Функция позволяет учесть удлинения скважин для забоя, глубины спуска насоса. Последние значения являются опциональными и могут быть опущены при проведении расчёта.

6.1.3. old_Ppump_calc_atma – расчёт давления на приеме по динамическому уровню

Функция рассчитывает давление на приёме насоса добывающей нефтяной скважины по известному значению затрубного давления и динамическому уровню.

Расчёт выполняется по модифицированной корреляции Хасана-Кабира оптимизированной для скорости вычисления для участка выше насоса. При расчёте пренебрегается трением в потоке и используются упрощённые PVT зависимости, что позволило получить результат в аналитическом виде и ускорить расчёты. [ссылку надо будет привести когда то]. Значение коэффициента сепарации используется для оценки объёмного расхода газа в межтрубном пространстве.

Результат расчёта - абсолютное значение давления на приёме насоса.

6.1.4. old_Potential_Pwf_atma – расчёт целевого забойного давления по доле газа

Функция рассчитывает целевое забойное давление добывающей нефтяной скважины, при котором достигается заданная доля газа в потоке.

Результат расчёта - абсолютное значение забойного давления.

6.1.5. old_BB_Pwf_atma – расчёт забойного давления фонтанирующей скважины по буферному давлению

Функция рассчитывает забойное давление фонтанирующей добывающей скважины по известному значению буферного давления. Расчет выполняется по корреляции Бегсса Брилла.

Расчет отличается рядом упрощений - из PVT свойств используется только значение газового фактора - давление насыщения и объемный коэффициент газа вычисляются по корреляциям.

В отличии от расчёта скважин с насосом в корреляции Беггса Брилла учитывается наличие трения. Хотя для низких дебитов эта корреляция может давать завышенные значения перепада давления.

Для расчётов рекомендуется использовать функцию Unifloc 7.31 VBA реализующую аналогичную функциональность с меньшим набором допущений

Результат расчёта - абсолютное значение забойного давления.

6.1.6. old_BB_Pwf_Pin_atma – расчёт забойного давления по давлению на приеме по корреляции Беггса-Брилла

Функция рассчитывает забойное давление добывающей скважины по известному значению давления на приёме. Расчёт выполняется по корреляции Бегсса-Брилла. Расчёт отличается рядом упрощений - из PVT свойств используется только значение газового фактора - давление насыщения и объёмный коэффициент газа вычисляются по корреляциям.

В отличии от расчёта скважин с насосом в корреляции Беггса Брилла учитывается наличие трения. Хотя для низких дебитов эта корреляция может давать завышенные значения перепада давления.

Для расчётов рекомендуется использовать функцию Unifloc 7.31 VBA реализующую аналогичную функциональность с меньшим набором допущений

Результат расчёта - абсолютное значение забойного давления.

Заключение

Заключение возможно будет тут когда то

Единицы измерений

Давление

atm, атм — физическая атмосфера

atma, атма — абсолютное значение величины в атмосферах

atmg, атми — избыточное (измеренное) значение величины в атмосферах. отличается от абсолютной на величину атмосферного давления (1.01325 атма)

Список сокращений и условных обозначений

γ_g – `gamma_gas` – удельная плотность газа, по воздуху.

ρ_{air} – `rho_air` – плотность воздуха, относительная плотность газа γ_g считается по воздуху $\rho_{air} = 1.22$ кг/м^3

γ_o – `gamma_oil` – удельная плотность нефти, по воде.

γ_w – `gamma_wat` – удельная плотность воды, по воде.

R_{sb} – `Rsb_m3m3` – газосодержание при давлении насыщения, м^3/м^3.

R_p – `Rp_m3m3` – замерной газовый фактор, м^3/м^3.

P_b – `Pb_atma` – давление насыщения, атма.

T_{res} – `Tres_C` – пластовая температура, °C.

B_{ob} – `Bob_m3m3` – объёмный коэффициент нефти, м^3/м^3.

μ_o – `mu_oil_cP` – вязкость нефти, по воде.

μ_{ob} – `Muob_cP` – вязкость нефти при давлении насыщения, сП.

Q_{liq} – `Qliq_scm3day` – дебит жидкости измеренный на поверхности (приведенный к стандартным условиям), м3/сут.

f_w – `fw_perc, fw_fr` – объёмная обводненность (fraction of water), проценты или доли единиц.

f_g – `fg_perc, fg_fr` – объёмная доля газа в потоке (fraction of gas), проценты или доли единиц.

PI – `pi_sm3dayatm` – коэффициент продуктивности скважины, м^3/сут/атм

Словарь терминов

Словарь описывает термины и сокращения широко используемые в описании и в системе Unifloc 7.31 VBA.

VBA — Visual Basic for Application язык программрования встроенный в Excel и использованный для написания макросов Unifloc 7.31 VBA.

VBE — Среда разработки для языка VBA. Встроена в Excel.

BHP, Pwf — Bottom hole pressure. Well flowing pressure. Забойное давление

BHT, TBH — Bottom hole temperature. Забойная температура

WHP, PWH — Well head pressure. Устьевое давление. Как правило, соответствует буферному давлению.

WHT, TWH — Well head temperature. Устьевая температура. Температура флюида на устье скважины. Температура в точке замера буферного давления.

IPR — Inflow performance relationship. Индикаторная кривая. Зависимость забойного давления от дебита для пласта. Широко используется в узловом анализе.

VLP, VFP — Vertical lift performance, vertical flow performance, outflow curve. Кривая лифта, кривая оттока. Зависимость забойного давления от дебита для скважины. Широко используется в узловом анализе.

ESP — Electrical submersible pump. Электрический центробежный насос.

GL — Gas Lift. Газлифтный способ эксплуатации добывающих скважин.

РНХ ЭЦН — Расходно напорная характеристика электрического центробежного насоса. Ключевая характеристика ЭЦН. Дается производителем в каталоге ЭЦН для новых насосов или определяется на стенде для ремонтных ЭЦН.

PVT — Pressure Volume Temperature. Общепринятое обозначение для физико-химических свойств пластовых флюидов - нефти, газа и воды.

MF — MultiPhase. Много Фазный поток. Префикс для функций имеющих дело с расчетом многофазного потока в трубах и скважине.

НКТ — Насосно компрессорная труба. Часть конструкции скважины. по колонне НКТ добывается скважинная продукция или закачивается вода. Может быть заменена в процессе эксплуатации при ремонте скважины.

ЭК — Эксплуатационная колонна. Часть конструкции скважины. Не может быть заменена в процессе эксплуатации при ремонте скважины.

ГЖС — Газо жидкостная смесь. Часто используется для обозначения совместно двигающихся флюидов в многофазном потоке - нефти, газа, воды.

Барботаж, ZNLF — Движение газа через неподвижный столб жидкости. ZNLF - zero net liquid flow. Встречается в скважинах с насосами - в межтрубном пространстве газ движется через неподвижный столб жидкости. Влияет на динамический уровень в скважине.

ЭЦН — Электрический центробежный насос.

УЭЦН — Установка электрического центробежного насоса. Включает весь комплекс погружного и поверхностного оборудования необходимого для работы насоса - насос (ЭЦН), погружной электрический двигатель (ПЭД), гидрозащита (ГЗ), входной модуль (ВМ) и газосепаратор (ГС), электрический кабель, станция управления (СУ) и другие элементы

ЧРП — Частотно регулируемый привод. Элемент УЭЦН обеспечивающий возможность вращения вала УЭЦН с различными частотами.

Список литературы

1. *Хасанов М.*, *Пашали А.*, *Хабибуллин Р.*, *Краснов В.* Оценка забойного давления механизированной скважины: теория и опыт применения // Научно-технический вестник ОАО НК Роснефть. — 2006. — Февр.
2. *Хасанов М.*, *Байков В.*, *Афанасьев В.*, *Мухамедшин Р.*, *Булгакова Г.*, *Гладков А.* Стандарт компании ЮКОС. Физические свойства нефти. Методы расчета. — Уфа Москва, 2002. — 45 с.
3. *Хасанов М.*, *Краснов В.*, *Хабибуллин Р.*, *Пашали А.*, *Семенов А.* Метод интерпретации отжима динамического уровня с использованием современных подходов к расчету многофазного потока // Нефтяное хозяйство. — 2009. — Янв.
4. *Khasanov M.*, *Krasnov V.*, *Khabibullin R.*, *Pashali A.*, *Semenov A.* New Method for Fluid Level Depression Test Interpretation Based on Modern Multiphase Flow Calculation Techniques. // SPE 129562. — 2010. — DOI: https://doi.org/10.2118/129562-MS.
5. *Khasanov M.*, *Krasnov V.*, *Khabibullin R.*, *Pashali A.* Monitoring and Optimization of Well Performance in Rosneft Oil Company–The Experience of the Unified Model Application for Multiphase Hydraulic Calculations // SPE 104359. — 2006. — DOI: https://doi.org/10.2118/104359-RU.
6. *Хабибуллин Р.*, *Пашали А.*, *Краснов В.*, *Бикбулатов С.*, *Еличев В.*, *Михайлов В.* Оптимизация режима работы фонтанирующих скважин в НК «Роснефть» // Нефтяное хозяйство. — 2006. — Сент.
7. *Khasanov M.*, *Krasnov V.*, *Khabibullin R.*, *Pashali A.*, *Guk V.*, *Litvinenko K.*, *Elichev V.*, *Prado M.* High GLR ESP technologies Comparison, Field Test Results // SPE 117414. — 2008. — DOI: https://doi.org/10.2118/117414-RU.
8. *Дроздов А.*, *Вербицкий В.*, *Деньгаев А.*, *Арсеньв А.*, *Литвиненко В.*, *Хабибуллин Р.*, *Литвиненко К.*, *Еличев В.* Результаты исследований работы погружных центробежных газосепараторов при эксплуатации скважин ООО «РН-Пурнефтегаз» с высоким входным газосодержанием. Сравнение стендовых и промысловых испытаний // SPE 117415. — 2008. — DOI: https://doi.org/10.2118/117415-RU.

9. *Krasnov V.*, *Khabibullin R.*, *Pashali A.*, *Guk V.*, *Litvinenko K.*, *Elichev V.*, *Prado M.* Performance Analysis of ESP Systems in High-GLR Wells: From Lab Experiments to Practical Field Applicationss // SPE 120628. — 2009. — DOI: https://doi.org/10.2118/120628-MS.

10. *Кудряшов С.*, *Хасанов М.*, *Краснов В.*, *Хабибуллин Р.*, *Семенов А.* Шаблоны Применения Технологий – эффективный способ систематизации знаний. // Нефтяное хозяйство. — 2007. — Нояб.

11. *Хасанов М.*, *Семенов А.*, *Пашали А.*, *Хабибуллин Р.* Подход к выбору оптимального способа эксплуатации скважин на примере Ванкорского месторождения. // Нефтяное хозяйство. — 2007. — Нояб.

12. *Шушаков А.*, *Павлечко Н.*, *Кибирев Е.*, *Бурцев Я.*, *Хабибуллин Р.*, *Хазиев А.*, *Кузнецов В.* Оптимизация работы газлифтного фонда скважин в условиях ЗАО Газпромнефть Оренбург с помощью нового расчетного модуля. // Нефтяное хозяйство. — 2015. — Дек.

13. *Lubnin A.*, *Yudin E.*, *Fazlytdinov R.*, *Khabibullin R.*, *Grishchenko E.*, *Bovt A.* A New Approach of Gas Lift Wells Production Optimization on Offshore Fields // SPE-181903. — 2016. — DOI: https://doi.org/10.2118/181903-RU.

14. *PEH*. Produced water formation volume factor. — 2021. — URL: https://petrowiki.spe.org/Produced_water_formation_volume_factor (visited on 01/21/2021).

15. *McCain Jr. W.* Reservoir-Fluid Property Correlations-State of the Art (includes associated papers 23583 and 23594) // SPE Res Eng SPE-18571-PA. — 1991. — DOI: https://doi.org/10.2118/18571-PA.

16. *McCain W. J.* The Properties of Petroleum Fluids, second edition. — PennWell Books, 1990.

17. *PetroSkills*. Variation of Ideal Gas Heat Capacity Ratio with Temperature and Relative Density. — 2013. — URL: http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/05/variation-of-ideal-gas-heat-capacity-ratio-with-temperature-and-relative-density/ (visited on 01/21/2021).

18. *Kareem L.*, *Iwalewa T.*, *Al-Marhoun M.* New explicit correlation for the compressibility factor of natural gas: linearized z-factor isotherms. // J Petrol Explor Prod. — 2016. — DOI: https://doi.org/10.1007/s13202-015-0209-3.

19. *PEH*. Gas viscosity. — 2021. — URL: http://petrowiki.org/Gas_viscosity (visited on 01/21/2021).

20. *Lee A.*, *Gonzalez M.*, *Eakin B.* The Viscosity of Natural Gases SPE-1340-PA // J Pet Technol. — 1966.

21. *Beggs H.*, *Robinson J.* SPE-5434-PA Estimating the Viscosity of Crude Oil Systems // J Pet Technol. — 1975. — DOI: http://dx.doi.org/10.2118/5434-PA.

22. *PEH*. Oil viscosity. — 2021. — URL: https://petrowiki.spe.org/Oil_viscosity (visited on 01/21/2021).

23. *Vazquez M.*, *Beggs H.* SPE-6719-PA Correlations for Fluid Physical Property Prediction // J Pet Technol. — 1980. — DOI: http://dx.doi.org/10.2118/6719-PA.

24. *PEH*. Oil System Correlations. — 2021. — URL: https://petrowiki.spe.org/PEH:Oil_System_Correlations (visited on 01/21/2021).

25. *PEH*. Oil System Correlations. Appendix table A-7 Undersaturated Oil Viscosity Correlations. — 2021. — URL: https://petrowiki.spe.org/File:Vol1_Page_329_Image_0001.png (visited on 01/21/2021).

26. *Standing M.* A Pressure-Volume-Temperature Correlation for Mixtures of California Oils and Gases // API Drilling and Production Practice. — 1947.

27. *PEH*. Oil System Correlations. Appendix table A-7 Dead Oil Viscosity Correlations. — 2021. — URL: https://petrowiki.spe.org/File:Vol1_Page_323_Image_0001.png (visited on 01/21/2021).

28. *Standing M.* Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems, ninth edition. — Society of Petroleum Engineers of AIME, 1981.

29. *Valkó P.*, *McCain W.* Reservoir oil bubblepoint pressures revisited; solution gas–oil ratios and surface gas specific gravities // Journal of Petroleum Science and Engineering. — 2003. — DOI: https://doi.org/10.1016/S0920-4105(02)00319-4.

30. *Velarde J.*, *Blasingame T.*, *McCain W.* Correlation of Black Oil Properties At Pressures Below Bubble Point Pressure - A New Approach. // SPE Annual Technical Meeting, Calgary, Alberta, June 1997. — 1997. — DOI: https://doi.org/10.2118/97-93.

31. *Игревский В.* Исследование влияния газовой фазы на характеристику многоступенчатого центробежного насоса при откачке газожидкостных смесей из скважин: дис. ... канд. тех. наук : 05.15.06. — М., 1977. — 190 с.

32. *Marquez R.*, *Prado M.* A New Robust Model For Natural Separation Efficiency // SPE 80922-MS. — 2003. — DOI: https://doi.org/10.2118/80922-MS.

33. *Perkins T.* Critical and Sub-Critical Flow of Multiphase Mixtures Through Chokes // SPE 20633, SPE Drilling and Complition. — 1993. — DOI: https://doi.org/10.2118/20633-PA.

34. *Bratland O.* Pipe Flow 1. Single-phase flow assurance. — URL: http://www.drbratland.com/free-book-pipe-flow-1-single-phase-flow-assurance/ (visited on 06/04/2020).

35. *Hasan A.*, *Kabir C.* Fluid Flow and Heat Tranfer in Wellbores. — SPE, 2002. — 181 p.

36. *Мукерджи Х.*, *Брилл Д.* Многофазный поток в скважинах. — Институт компьютерных исследований, 2006. — 384 с.

37. *Khasanov M.*, *Krasnov V.*, *Khabibullin R.*, *Pashali A.*, *Guk V.* A Simple Mechanistic Model for Void-Fraction and Pressure-Gradient Prediction in Vertical and Inclined Gas/Liquid Flow // SPE Prod and Oper, SPE-108506-PA A. — 2010. — Jan. — DOI: https://doi.org/10.2118/108506-MS.

38. *Сахаров В.*, *Мохов М.* Эксплуатация нефтяных скважин, учебное пособие. — РГУ нефти и газа, 2008. — 250 с.

39. *Brown K.* The Technology of Artificial Lift Methods. Volume 4. Production Optimization of Oil and Gas Wells by Nodal System Analysis. — PennWell, 1984. — 464 p.

40. *Gabor T.* Electrical Submersible Pumps Manual. 2nd edition. — Elsevier, 2018. — 578 p. — DOI: 10.1016/B978-1-85617-557-9.X0001-2.

Приложение А

Автоматически сгенерированное описание

Далее следует описание расчётных функций Unifloc 7.31 VBA автоматически сгенерированное из исходного кода. Подробности по ключевым пользовательским функциям можно найти в описании выше. Автоматическое описание возможно будет более полным и актуальным пока продолжается разработка.

A.1. crv_fit_linear

```
'Аппроксимация данных линейной функцией.
'Решается задача min|XM-Y| ищется вектор M
Public Function crv_fit_linear(YA, _
                               XA, _
                      Optional out As Long, _
                      Optional weight, _
                      Optional constraints)
' YA     - Y вектор исходных данных [0..N-1] (столбец или массив)
' XA     - x матрица исходных данных [0..N-1, 0..D-1]
'          (таблица или массив)
' out    - тип вывода,
'       out=0 (по умолчанию) коэффициенты аппроксимации [0..D-1],
'       out=1 код ошибки подбора аппроксимации
'       out=2 отчет по подбору аппроксимации,
'           AvgError, AvgRelError, MaxError, RMSError, TaskRCond.
' weight - вектор весов [0..N-1] для каждого параметра
' constraints - матрица ограничений C [0..K-1, 0..D] такая что
'                C[I,0]*M[0] + ... + C[I,D-1]*C[D-1] = CMatrix[I,D]
' результат
'           вектор M минимизирующий min|XM-Y|
```

A.2. crv_fit_poly

```
'Аппроксимация данных полиномом функцией.
'Решается задача min|XM-Y| ищется вектор M
Public Function crv_fit_poly(YA As Variant, _
                             XA As Variant, _
                             m As Long, _
                      Optional out As Long, _
                      Optional XIA As Variant, _
                      Optional weight, _
                      Optional constraints)
' YA     - Y вектор исходных данных [0..N-1] (столбец или массив)
' XA     - X вектор исходных данных [0..N-1] (таблица или массив)
' M      - степень полинома для аппроксимации
```

```
' out   - тип вывода, out=0 (по умолчанию) значения полинома для XIA,
'      out=1 код ошибки аппроксимации
'      out=2 отчет по подбору аппроксимации,
'            AvgError, AvgRelError, MaxError, RMSError, TaskRCond.
' XIA   - X вектор значений для расчета аппроксимации [0..D-1]
' weight   - вектор весов [0..N-1] для каждого параметра
' constraints - матрица ограничений C[0..K-1,0..2].
'       C[i,0] - значение x где задано ограничение
'       C[i,1] - велична ограничения,
'       C[i,2] - тип ограничения (0 -значение,1 -производная)
' результат
'          вектор YIA значений полинома для XIA
```

A.3. crv_fit_spline_1D

```
'Поиск пересечений для кривых заданных таблицами.
'Используется линейная интерполяция.
'Возможно несколько решений.
Public Function crv_fit_spline_1D(XA As Variant, _
                                  YA As Variant, _
                                  m As Long, _
                        Optional XIA As Variant, _
                        Optional WA As Variant, _
                        Optional XCA As Variant, _
                        Optional YCA As Variant, _
                        Optional DCA As Variant, _
                        Optional hermite As Boolean = False)
' XA    - x значения исходных данных (строка значений или массив)
' YA    - y значения исходных данных (столбец значений или массив)
' M     - количество точек для сплайна интерполяции
'         должно быть четное для hermite = True
' XIA   - таблица выходных значений
'         столбц значений (x) или массив в возрастающем порядке
'  если не заданы возвращаются кубические коэффициента для сегментов
' WA    - веса исходных данных
' XCA   - x значения матрицы ограничений (столбец или массив)
' YCA   - величина ограничения для заданного значения
'         (столбец или массив)
' DCA   - тип ограничения. 0 - значение, 1 - наклон.
```

```
'          (столбец или массив).
'          если хоть одно из ограничений не задано - они не учитываются
' результат
'           значение функции для заданного XIA
```

A.4. crv_interpolation

```
' функция поиска значения функции по заданным табличным данным
↪  (интерполяция)
Public Function crv_interpolation(x_points, y_points, x_val, _
                      Optional ByVal type_interpolation As Integer = 0)
' x_points  - таблица аргументов функции
' y_points  - таблица значений функции
'             количество агрументов и значений функции должно совпадать
'             для табличной функции одному аргументу соответствует
'             строго одно значение функции (последнее)
' x_val     - аргумент для которого надо найти значение
'             одно значение в ячейке или диапазон значений
'             для диапазона аргументов будет найден диапазон значений
'             диапазоны могут быть заданы как в строках,
'             так и в столбцах
' type_interpolation - тип интерполяции
'             0 - линейная интерполяция
'             1 - кубическая интерполяция
'             2 - интерполяция Акима (выбросы)
'                 https://en.wikipedia.org/wiki/Akima_spline
'             3 - кубический сплай Катмулла Рома
'                 https://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_Hermite_spline
' результат
'             значение функции для заданного x_val
```

A.5. crv_interpolation_2D

```
' функция поиска значения функции по двумерным табличным данным
↪  (интерполяция 2D)
Function crv_interpolation_2D(XA As Variant, _
                              YA As Variant, _
                              FA As Variant, _
                     Optional XYIA As Variant, _
                     Optional out As Long = 1, _
                     Optional ByVal type_interpolation As Integer = 0)
                     ↪  As Variant
' XA    - x значения исходных данных (строка значений или массив)
' YA    - y значения исходных данных (столбец значений или массив)
' FA    - табличные значения интерполируемой функции,
'         двумерная таблица или массив
' XYIA  - таблица значений для которой надо найти результат
'         два столбца значений (x,y) или массив с двумя колонками
'         если не заданы возвращаются кубические коэффициента
'         для каждого сегмента
' out   - для интерполяции кубическими сплайнами
'           out = 0 возвращаются только значения
'           out = 1 возвращаются значения и производные
' type_interpolation - тип интерполяции
'                    0 - линейная интерполяция
'                    1 - кубическая интерполяция
' результат
'             значение функции для заданного XYIA
```

A.6. crv_intersection

```
'Поиск пересечений для кривых заданных таблицами.
'Используется линейная интерполяция.
'Возможно несколько решений.
Public Function crv_intersection(x1_points, y1_points, _
                                 x2_points, y2_points)
' x1_points  - таблица аргументов функции 1
' y1_points  - таблица значений функции 1
```

```
'             количество агрументов и значений функции должно совпадать
'             для табличной функции одному аргументу соответствует
'             строго одно значение функции (последнее)
' x2_points  - таблица аргументов функции 2
' y2_points  - таблица значений функции 2
'             количество агрументов и значений функции должно совпадать
'             для табличной функции одному аргументу соответствует
'             строго одно значение функции (последнее)
' результат
'             массив значений аргументов пересечений двух функций
```

A.7. crv_parametric_interpolation

```
' интерполяция функции заданной параметрически
' параметр номер значения
Public Function crv_parametric_interpolation(x_points, y_points, x_val,
↪  _
                        Optional ByVal type_interpolation As Integer = 0,
                         ↪  _
                         Optional param_points = -1)
' x_points  - таблица аргументов функции
' y_points  - таблица значений функции
'             количество агрументов и значений функции должно совпадать
'             для табличной функции одному аргументу соответствует
'             строго одно значение функции (последнее)
' x_val     - аргумент для которого надо найти значение
'             одно значение в ячейке или диапазон значений
'             для диапазона аргументов будет найден диапазон значений
'             диапазоны могут быть заданы как в строках,
'             так и в столбцах
' type_interpolation - тип интерполяции
'             0 - линейная интерполяция
'             1 - кубическая интерполяция
'             2 - интерполяция Акима (выбросы)
'                 https://en.wikipedia.org/wiki/Akima_spline
'             3 - кубический сплайн Катмулла Рома
'                 https://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_Hermite_spline
' результат
'             значение функции для заданного x_val
```

A.8. crv_solve

```
' функция решения уравнения в табличном виде f(x) = y_val
' ищется значение аргумента соответствующее заданному значению
' используется линейная интерполяция
' возможно несколько решений
Public Function crv_solve(x_points, y_points, ByVal y_val As Double)
' x_points  - таблица аргументов функции
' y_points  - таблица значений функции
'             количество агрументов и значений функции должно совпадать
'             для табличной функции одному аргументу соответствует
'             строго одно значение функции (последнее)
```

```
' y_val     - значение функции для которого надо ищутся аргументы
'             строго одно вещественное число (ссылка на ячейку)
' результат
'             массив значений аргументов - решений уравнения
```

A.9. decode_json

```
' Функция декодирования json строки,
' позволяет вывести содержимое json строки в таблицу
Public Function decode_json(json, _
                          Optional transpose As Boolean = False, _
                          Optional keys_filter, _
                          Optional only_values As Boolean = False, _
                          Optional safe_out As Boolean = False)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' transpose - выбор вывода в строки или в столбцы
' keys_filter - строка с ключами, которые надо вывести
' only_values - если = 1 подписи выводиться не будут
' safe_out - флаг заставляет выводить массив сторок,
'            что может работать лучше в офисе 2016 и ранее
' результат - закодированная строка
```

A.10. decode_json_crv

```
' Функция декодирования json строки с табличной кривой,
' позволяет вывести содержимое json строки в таблицу (на лист)
Public Function decode_json_crv(json, _
                       Optional transpose As Boolean = False)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' transpose - выбор вывода в строки или в столбцы
' результат - закодированная строка
```

A.11. decode_json_k_sep

```
' Функция извлекает список значений коэффициентов сепарации
' из json строки
' нужна для удобства векторных расчетов
Public Function decode_json_k_sep(json)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' результат - закодированная строка
```

A.12. decode_json_pt

```
' Функция извлекает списки давлений и температур из json строки
' нужна для удобства векторных расчетов
Public Function decode_json_pt(json)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' результат - закодированная строка
```

A.13. decode_json_p_atma

```
' Функция извлекает список давлений из json строки
' нужна для удобства векторных расчетов
Public Function decode_json_p_atma(json)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' результат - закодированная строка
```

A.14. decode_json_q_liq_sm3day

```
' Функция извлекает список дебитов из json строки
' нужна для удобства векторных расчетов
Public Function decode_json_q_liq_sm3day(json)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' результат - закодированная строка
```

A.15. decode_json_t_C

```
' Функция извлекает список температур из json строки
' нужна для удобства векторных расчетов
Public Function decode_json_t_C(json)
' json   - строка содержащая результаты расчета
' результат - закодированная строка
```

A.16. Ei

```
' Расчет интегральной показательной функции Ei(x)
Function Ei(ByVal x As Double)
' x  - агрумент функции, может быть и положительным и отрицательным
' результат - значение функции
```

A.17. encode_ambient_formation_string

```
' функция кодирования температурных парамметров окружающей среды
Public Function encode_ambient_formation_string( _
    Optional ByVal therm_cond_form_WmC As Double = 2.4252, _
```

```
    Optional ByVal sp_heat_capacity_form_JkgC As Double = 200, _
    Optional ByVal therm_cond_cement_WmC As Double = 6.965, _
    Optional ByVal therm_cond_tubing_WmC As Double = 32, _
    Optional ByVal therm_cond_casing_WmC As Double = 32, _
    Optional ByVal heat_transfer_casing_liquid_Wm2C As Double = 200, _
    Optional ByVal heat_transfer_casing_gas_Wm2C As Double = 10, _
    Optional ByVal heat_transfer_fluid_convection_Wm2C As Double = 200,
    ↪  _
    Optional ByVal t_calc_hr As Double = 240)
' therm_cond_form_WmC - теплопроводность породы окружающей среды
' sp_heat_capacity_form_JkgC - удельная теплоемкость породы окружающей
↪  среды
' therm_cond_cement_WmC - теплопроводность цементного камня вокруг
↪  скважины
' therm_cond_tubing_WmC - теплопроводность стенок НКТ
' heat_transfer_casing_liquid_Wm2C - теплопередача через затруб
↪  с жидкостью
' heat_transfer_casing_gas_Wm2C - теплопередача через затруб с газом
' heat_transfer_fluid_convection_Wm2C - теплопередача в потоке
'                                 с жидкостью за счет конвекции
' t_calc_hr - время на которое расчитывается распределение температуры
'
```

A.18. encode_arange

```
' кодирование списка значений для векторных расчетов
' значения распределены равномерно
Public Function encode_arange(ByVal val_from As Double, _
                              ByVal val_to As Double, _
                              ByVal step As Double)
' val_from   - первое значение списка
' val_to     - последнее значение списка
' step       - шаг значений списка
```

A.19. encode_ESP_cable

```
' функция кодирования параметров
' кабельной линии ПЭД в строку
Public Function encode_ESP_cable( _
            Optional ByVal length_m As Double = 1000, _
            Optional ByVal cable_R_Omkm As Double = 1.18, _
            Optional ByVal cable_X_Omkm As Double = 0.01, _
            Optional ByVal cable_t_max_C As Double = 120, _
            Optional ByVal manufacturer As String = "default", _
            Optional ByVal name As String = "default_name", _
            Optional ByVal d_mm As Double = 16)
' length_m - длина кабельной линии, м
' cable_R_Omkm - удельное активное сопротивление
' cable_X_Omkm - удельное реактивное сопротивление
' cable_t_max_C - максимально допустимая температура
' manufacturer - производитель, для справки
' name  - название кабеля, для справки
' d_mm - диаметр жилы
```

A.20. encode_ESP_motor

```
' функция кодирования параметров ПЭД в строку
Public Function encode_ESP_motor( _
            Optional ByVal motor_ID As Long = 0, _
            Optional ByVal P_nom_kW As Double = 30, _
            Optional ByVal U_nom_lin_V As Double = 1000, _
            Optional ByVal f_nom_Hz As Double = 50, _
            Optional ByVal eff_nom_fr As Double = 0.82, _
            Optional ByVal cosphi_nom_fr As Double = 0.88, _
            Optional ByVal slip_nom_fr As Double = 0.053, _
            Optional ByVal U_surf_high_lin_V As Double = 1000, _
            Optional ByVal f_surf_Hz As Double = 50, _
            Optional ByVal power_fact_kW As Double = 30, _
            Optional ByVal d_od_mm As Double, _
            Optional ByVal lambda As Double, _
            Optional ByVal alpha0 As Double, _
```

```
            Optional ByVal xi0 As Double, _
            Optional ByVal Ixcf As Double)
'motor_ID - тип 0 - постоянные значения,
'               1 - задается по каталожным кривым, ассинхронный
'               2 - задается по схеме замещения, ассинхронный
'P_nom_kW       - номинальная мощность двигателя кВт
'U_nom_lin_V    - номинальное напряжение двигателя, линейное, В
'f_nom_Hz       - номинальная частота тока, Гц
'eff_nom_fr     - КПД при номинальном режиме работы
'cosphi_nom_fr  - коэффициент мощности при номинальный
'slip_nom_fr    - скольжение при номинальном режиме работы
'U_surf_high_lin_V - напряжение на поверхности
'f_surf_Hz - частота тока на поверхности
'power_fact_kW - фактическая потребляемая мощность
'd_od_mm            - внешний диаметр - габарит ПЭД
'lambda - для motorID = 2 перегрузочный коэффициент
'         отношение макс момента к номинальному
'alpha0 - параметр. влияет на положение макс КПД.для motorID = 2
'xi0    - параметр. определяет потери момента при холостом ходе.
'         для motorID = 2
'Ixcf   - поправка на поправку тока холостого хода
'         при изменении напряжения и частоты от минимальной.
```

A.21. encode_ESP_pump

```
' функция кодирования параметров работы УЭЦН в строку
Public Function encode_ESP_pump( _
            Optional ByVal ESP_ID As Long = "1005", _
            Optional ByVal head_nom_m As Double = 2000, _
            Optional ByVal num_stages As Integer = 0, _
            Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
            Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
            Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
            Optional ByVal calibr_power As Double = 1, _
            Optional ByVal gas_correct_model As Integer = 0, _
            Optional ByVal gas_correct_stage_by_stage As Integer = 0, _
            Optional ByVal dnum_stages_integrate = 1)
' esp_ID         - идентификатор насоса
' head_nom_m     - номинальный напор системы УЭЦН
```

```
'                    - соответствует напора в записи ЭЦН 50-2000
' num_stages         - количество ступеней, если задано
'                      перекрывает значение напора
' freq_Hz            - частота, Гц
' calibr_head        - калибровка по напору
' calibr_rate        - калибровка по подаче
' calibr_power       - калибровка по мощности
' gas_correct_model - модель калибровки по газу
' gas_correct_stage_by_stage - флаг метода применения калибровки по
↪  газу
' dnum_stages_integrate - шаг интегрирования для расчета
' результат            - строка с параметрами УЭЦН
```

A.22. encode_ESP_separation

```
' функция кодирования газосепаратора
Public Function encode_ESP_separation( _
            Optional ByVal separation_mode As String, _
            Optional ByVal gassep_type As Long, _
            Optional ByVal natsep_type As Long = 0, _
            Optional ByVal psep_man_atma As Double, _
            Optional ByVal tsep_man_C As Double, _
            Optional ByVal ksep_gassep_man_d As Double, _
            Optional ByVal ksep_nat_man_d As Double, _
            Optional ByVal ksep_liquid_man_d As Double, _
            Optional ByVal M_Nm As Double, _
            Optional ByVal manufacturer As String = "no", _
            Optional ByVal name As String = "no", _
            Optional ByVal length_m As Double)
' separation_mode - режим расчета сепарации
' gassep_type - тип - номер из базы
' natsep_type - модель расчета естественной сепарации
' psep_man_atma  - давление для расчета
'                     коэффициента сепарации заданного вручную
' tsep_man_C  - температура для расчета
'                     коэффициента сепарации заданного вручную
' ksep_gassep_man_d  - коэффициент сепарации ГС заданный вручную
' ksep_nat_man_d  - коэффициент сепарации натуральной
'                    заданный вручную
```

```
' ksep_liquid_man_d - коэффициент сепарации жидкости для режима
'                     потока через затруб
' M_Nm  - момент на валу
' manufacturer - производитель, для справки
' name  - название кабеля, для справки
' length_m - длина кабельной линии, м
```

A.23. encode_feed

```
'Функция кодирования параметров потока флюидов в строку,
Public Function encode_feed( _
          Optional ByVal q_liq_sm3day As Double = 10, _
          Optional ByVal fw_perc As Double = -1, _
          Optional ByVal rp_m3m3 As Double = -1, _
          Optional ByVal q_gas_free_sm3day As Double = -1, _
          Optional ByVal fluid As String = PVT_DEFAULT)
' q_liq_sm3day  - дебит жидкости в ст.условиях.
' fw_perc       - ободненность, %
' rp_m3m3       - газовый фактор, м3/м3:
' q_gas_free_sm3day - расход свободного газа, ст. м3/сут
'
' результат - закодированная строка
```

A.24. encode_feed_list

```
'Функция кодирования параметров потока флюидов в строку,
Public Function encode_feed_list( _
          Optional ByVal q_liq_sm3day As Variant = 10, _
          Optional ByVal fw_perc As Double = -1, _
          Optional ByVal rp_m3m3 As Double = -1, _
          Optional ByVal q_gas_free_sm3day As Double = -1, _
          Optional ByVal fluid As String = PVT_DEFAULT)
' q_liq_sm3day  - дебит жидкости в ст.условиях.
' fw_perc       - ободненность, %
```

```
' rp_m3m3        - газовый фактор, м3/м3:
' q_gas_free_sm3day - расход свободного газа, ст. м3/сут
'
' результат - закодированная строка
```

A.25. encode_json

```
' функция кодирования диапазона ячеек в json строку
Public Function encode_json(rng, _
        Optional always_collection As Boolean = False)
' rng        - диапазон ячеек для кодирования
'            один столбец кодируется в коллекцию
'            два столбца кодируются в словарь
' always_collection - флаг принудительного кодирования
'            в коллекцию
' результат - закодированная строка
```

A.26. encode_pipe

```
' задание параметров траектории трубы в json строке
Public Function encode_pipe(Optional h_list_m As Variant = 1000, _
                            Optional diam_list_mm As Variant = 62, _
                            Optional roughness_m As Double = 0)
' h_list_m - число - длина вертикальной трубы или массив или range
'          содержащий зависимость вертикальной глубины от измеренной
' diam_list_mm - число-внутренний диаметр трубы или массив или range
'          содержащий зависимость внутреннего от измеренной глубины
' roughness_m - число - шероховатость, одна для всей трубы
' результат - json строка с описанием трубы
```

A.27. encode_PVT

```
' Функция кодирования параметров PVT в строку,
' для передачи PVT свойств в прикладные функции Унифлок.
Public Function encode_PVT( _
                    Optional ByVal gamma_gas As Double = const_gg_, _
                    Optional ByVal gamma_oil As Double = const_go_, _
                    Optional ByVal gamma_wat As Double = const_gw_, _
                    Optional ByVal rsb_m3m3 = const_rsb_default, _
                    Optional ByVal pb_atma, _
                    Optional ByVal t_res_C, _
                    Optional ByVal bob_m3m3, _
                    Optional ByVal muob_cP, _
                    Optional ByVal PVT_corr_set _
                    )
' gamma_gas - удельная плотность газа, по воздуху.
'              По умолчанию const_gg_ = 0.6
' gamma_oil - удельная плотность нефти, по воде.
'              По умолчанию const_go_ = 0.86
' gamma_wat - удельная плотность воды, по воде.
'              По умолчанию const_gw_ = 1
' rsb_m3m3  - газосодержание при давлении насыщения, м3/м3.
'              По умолчанию const_rsb_default = 100
' rp_m3m3 - замерной газовый фактор, м3/м3.
'            Имеет приоритет перед rsb если rp < rsb
' pb_atma - давление насыщения при  температуре t_res_C, атма.
'            Опциональный калибровочный параметр,
'            если не задан или = 0, то рассчитается по корреляции.
' t_res_C  - пластовая температура, С.
'            Учитывается при расчете давления насыщения.
'            По умолчанию  const_tres_default = 90
' bob_m3m3 - объемный коэффициент нефти при давлении насыщения
'             и пластовой температуре, м3/м3.
'             По умолчанию рассчитывается по корреляции.
' muob_cP  - вязкость нефти при давлении насыщения.
'             и пластовой температуре, сП.
'             По умолчанию рассчитывается по корреляции.
' PVT_corr_set - номер набора PVT корреляций для расчета:
'            0 - на основе корреляции Стендинга;
'            1 - на основе кор-ии Маккейна;
'            2 - на основе упрощенных зависимостей.
' результат - закодированная строка
```

A.28. encode_table_json

```
' кодирование табличных результатов в json формат
Public Function encode_table_json(key As range, _
                                  val_name As range, _
                                  val As range)
' key      - столбец со значениями ключей (ID)
'            должны быть уникальные значения
' val_name - строка с названиями полей значений
'            должны быть уникальные значения
' val      - таблица со значениями, которые надо
'            закодировать
```

A.29. encode_t_model

```
' кодирование параметров температурной модели трубы/скважины
Public Function encode_t_model( _
            Optional t_model As TEMP_CALC_METHOD = StartEndTemp, _
            Optional t_list_C As Variant = 50, _
            Optional t_start_C As Double = -100, _
            Optional t_end_C As Double = -100, _
            Optional param As String = "")
' t_model   - номер температурной модели
' t_list_C  - массив n*2 распределения температуры
' t_start_C - температура в начале трубы
' t_end_C   - температура в конце трубы
' param     - параметры температурной модели
'             список параметров в мануале
```

A.30. encode_well_construction_string

```
' функция кодирования параметров работы скважины с газлифтом
Public Function encode_well_construction_string( _
            ByVal h_perf_m As Double, _
            ByVal h_tub_m As Double, _
            ByVal h_list_m As Variant, _
            ByVal d_tub_list_mm As Variant, _
            ByVal d_cas_list_mm As Variant, _
    Optional ByVal d_choke_mm As Double, _
    Optional ByVal t_val_C As Variant, _
    Optional ByVal rough_m As Double = 0.0001)
'h_perf_m - глубина перфорации по длине скважины
'           точка узлового анализа для забоя
'h_tub_m - глубина спуска НКТ, или глубина
'          спуска ЭЦН
'h_list_m  - траектория скважины, если число то измеренная
'           длина, range или таблица [0..N,0..1] то траектория
'd_tub_list_mm - диаметр НКТ. range или таблица [0..N,0..1]
'd_cas_list_mm - диаметр эксп колонны.
'              range или таблица [0..N,0..1]
'd_choke_mm - диаметр штуцера
't_val_C   - температура вдоль скважины
'           если число то температура на устье скважины
'           если range или таблица [0..N,0..1] то температура
'           окружающей среды по вертикальной глубине, C
'rough_m    - шероховатость трубы
' результат     - строка с закодированными параметрами
```

A.31. ESP_calc

```
''функция расчета давления на выходе/входе ЭЦН в рабочих условиях
''параметры насоса задаются, как json строка
'Public Function ESP_calc( _
'                 ByVal p_calc_atma As Double, _
'        Optional ByVal t_intake_C As Double = 50, _
'        Optional ByVal t_dis_C As Double = 50, _
'        Optional ByVal feed As String = "", _
'        Optional ByVal pump_json As String = "", _
'        Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
'        Optional ByVal param As String)
```

```
'' p_calc_atma      - давление для которого делается расчет
''                    либо давление на приеме насоса
''                    либо давление на выкиде насоса
''                    определяется параметром calc_along_flow
'' t_intake_C       - температура на приеме насоса
'' t_dis_C          - температура на выкиде насоса.
''             если = 0 и calc_along_flow = 1 то рассчитывается
'' feed     - параметры потока флюидов json строка. Используйте
''            функцию encode_feed() для генерации
'' pump_json        - строка с параметрами насоса
'' calc_along_flow  - режим расчета снизу вверх или сверху вниз
''          calc_along_flow = True => p_atma давление на приеме
''          calc_along_flow = False => p_atma давление на выкиде
'' param     - дополнительные параметры расчета потока
'' результат   - массив значений включающий
```

A.32. ESP_eff_fr

```
' номинальный КПД ЭЦН (на основе каталога ЭЦН)
' учитывается поправка на вязкость
Public Function ESP_eff_fr( _
        ByVal qliq_m3day As Double, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal pump_id As Long = 737, _
        Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1)
' qliq_m3day - дебит жидкости в условиях насоса (стенд)
' num_stages  - количество ступеней
' freq_Hz     - частота вращения насоса
' pump_id     - номер насоса в базе данных
' mu_cSt      - вязкость жидкости, сСт;
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
```

A.33. ESP_gassep_ksep_d

```
' расчет коэффициента сепарации газосепаратора
' по результатам стендовых испытаний РГУ нефти и газа
Public Function ESP_gassep_ksep_d( _
                ByVal gsep_type_TYPE As Integer, _
                ByVal gas_frac_d As Double, _
                ByVal qliq_sm3day As Double, _
       Optional ByVal freq_Hz As Double = 50) As Double
' MY_SEPFACTOR - Вычисление коэффициента сепрации в точке
'   gsep_type_TYPE    - тип сепаратора (номер от 1 до 29)
'    1  - 'GDNK5'
'    2  - 'VGSA (VORTEX)'
'    3  - 'GDNK5A'
'    4  - 'GSA5-1'
'    5  - 'GSA5-3'
'    6  - 'GSA5-4'
'    7  - 'GSAN-5A'
'    8  - 'GSD-5A'
'    9  - 'GSD5'
'    10 - '3MNGB5'
'    11 - '3MNGB5A'
'    12 - '3MNGDB5'
'    13 - '3MNGDB5A'
'    14 - 'MNGSL5A-M'
'    15 - 'MNGSL5A-TM'
'    16 - 'MNGSL5-M'
'    17 - 'MNGSL5-TM'
'    18 - 'MNGSLM 5'
'    19 - 'MNGD 5'
'    20 - 'GSIK 5A'
'    21 - '338DSR'
'    22 - '400GSR'
'    23 - '400GSV'
'    24 - '400GSVHV'
'    25 - '538 GSR'
'    26 - '538 GSVHV'
'    27 - '400FSR(OLD)'
'    28 - '513GRS(OLD)'
'    29 - '675HRS'
'
'   gas_frac_d       - газосодержание на входе в газосепаратор
```

```
'   qliq_sm3day      - дебит жидкости в стандартных условиях
'   freq_Hz          - частота вращения, Гц
```

A.34. ESP_head_m

```
' номинальный напор ЭЦН (на основе каталога ЭЦН)
' учитывается поправка на вязкость и калибровки
Public Function ESP_head_m( _
        ByVal qliq_m3day As Double, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal pump_id As Long, _
        Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1)
' qliq_m3day - дебит жидкости в условиях насоса (стенд)
' num_stages  - количество ступеней
' freq_Hz    - частота вращения насоса
' pump_id    - номер насоса в базе данных
' mu_cSt     - вязкость жидкости, сСт;
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
```

A.35. ESP_id_by_rate

```
' функция возвращает идентификатор типового насоса по значению
' номинального дебита
Public Function ESP_id_by_rate(q As Double)
' возвращает ID в зависимости от номинального дебита.
' насосы подобраны вручную из текущей базы.
' Q - номинальный дебит
```

A.36. ESP_motor_calc_mom

```
' функция расчета параметров двигателя по заданному моменту на валу
Public Function ESP_motor_calc_mom(ByVal mom_Nm As Double, _
                        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
                        Optional ByVal U_V As Double = -1, _
                        Optional ByVal motor_json As String = "", _
                        Optional ByVal cable_json As String = "", _
                        Optional ByVal param As String)

' mom_Nm      - момент развиваемый двигателем на валу, Нм
' freq_Hz     - частота вращения внешнего поля
' U_V         - напряжение рабочее, на поверхности, линейное, В
'               если задана кабельная линия, то учитывается
' motor_json  - строка с закодированными данными ПЭД
' cable_json  - строка с закодированными параметрами кабеля
' param       - строка с закодированными параметрами
```

A.37. ESP_motor_calc_slip

```
' расчет полной характеристики двигателя от проскальзования
' по заданной величине скольжения (на основе схемы замещения)
Public Function ESP_motor_calc_slip(ByVal s As Double, _
                        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
                        Optional ByVal U_V As Double = -1, _
                        Optional ByVal motor_json As String = "", _
                        Optional ByVal cable_json As String = "", _
                        Optional ByVal param As String)

' s           - проскальзывание,
' freq_Hz     - частота вращения внешнего поля
' U_V         - напряжение рабочее, на поверхности, линейное, В
'               если задана кабельная линия, то учитывается
' motor_json  - строка с закодированными данными ПЭД
' cable_json  - строка с закодированными параметрами кабеля
' param       - строка с закодированными параметрами
```

A.38. ESP_motor_nameplate

```
' функция выдает номинальные параметры ПЭД, корректированные на частоту
Public Function ESP_motor_nameplate( _
                        Optional ByVal motor_json As String = "", _
                        Optional ByVal cable_json As String = "", _
                        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
                        Optional ByVal param As String)
' опциональные параметры
' motor_json  - строка с закодированными данными ПЭД
' cable_json  - строка с закодированными параметрами кабеля
' freq_Hz     - частота тока, Гц
' param       - строка с закодированными параметрами
'   результат   - формальное название ПЭД
```

A.39. ESP_name

```
' название ЭЦН по номеру
Public Function ESP_name(Optional ByVal pump_id As Long) As String
' pump_id    - идентификатор насоса в базе данных
' результат - название насоса
```

A.40. ESP_optRate_m3day

```
' оптимальный дебит ЭЦН для заданной частоты
' по номинальной кривой РНХ
Public Function ESP_optRate_m3day( _
    Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
    Optional ByVal pump_id As Long, _
    Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
    Optional ByVal calibr_rate As Double = 1) As Double
```

```
' freq_Hz    - частота вращения ЭЦН
' pump_id     - идентификатор насоса в базе данных
```

A.41. ESP_power_W

```
' номинальная мощность потребляемая ЭЦН с вала (на основе каталога ЭЦН)
' учитывается поправка на вязкость
Public Function ESP_power_W( _
        ByVal qliq_m3day As Double, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal pump_id As Long = 737, _
        Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1)
' qliq_m3day - дебит жидкости в условиях насоса (стенд)
' num_stages  - количество ступеней
' freq_Hz     - частота вращения насоса
' pump_id     - номер насоса в базе данных
' mu_cSt      - вязкость жидкости, сСт;
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
```

A.42. ESP_p_atma

```
'функция расчета давления на выходе/входе ЭЦН в рабочих условиях
'большинство параметров задается явно
Public Function ESP_p_atma( _
                ByVal p_calc_atma, _
        Optional ByVal t_intake_C = 50, _
        Optional ByVal t_dis_C = 50, _
        Optional ByVal feed As String = "", _
```

```
        Optional ByVal pump_id As Long, _
        Optional ByVal num_stages As Integer = 1, _
        Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
        Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
        Optional ByVal calibr_head As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_rate As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_power As Double = 1, _
        Optional ByVal gas_correct_model As Integer = 0, _
        Optional ByVal gas_correct_stage_by_stage As Integer = 0, _
        Optional ByVal param As String)
' p_calc_atma      - давление для которого делается расчет
'                    либо давление на приеме насоса
'                    либо давление на выкиде насоса
'                    определяется параметром calc_along_flow
' t_intake_C       - температура на приеме насоса
' t_dis_C          - температура на выкиде насоса.
'             если = 0 и calc_along_flow = 1 то рассчитывается
' feed     - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'            функцию encode_feed() для генерации
' pump_id          - идентификатор насоса
' num_stages       - количество ступеней
' freq_Hz          - частота вращения вала ЭЦН, Гц
' calc_along_flow  - режим расчета снизу вверх или сверху вниз
'          calc_along_flow = True => p_atma давление на приеме
'          calc_along_flow = False => p_atma давление на выкиде
' calibr_head - калибровка (множитель) на напор
' calibr_rate - калибровка (множитель) на расход
' calibr_power - калибровка (множитель) на мощность
' gas_correct_model - модель калибровки по газу
' gas_correct_stage_by_stage - модель применятеся
'                      для всех ступеней по отдельности
' param     - дополнительные параметры расчета потока
' результат   - массив значений включающий
```

A.43. ESP_rate_max_sm3day

```
' максимальный дебит ЭЦН для заданной частоты
' по номинальной кривой РНХ
Public Function ESP_rate_max_sm3day( _
```

```
    Optional ByVal freq_Hz As Double = 50, _
    Optional ByVal pump_id As Long, _
    Optional ByVal mu_cSt As Double = -1, _
    Optional ByVal calibr_rate As Double = 1) As Double
' freq_Hz    - частота вращения ЭЦН
' pump_id     - идентификатор насоса в базе данных
' mu_cSt - вязкость для расчета поправок
' calibr_rate - калибровка на расход
```

A.44. ESP_system_calc

```
' расчет производительности системы УЭЦН
' считает перепад давления, электрические параметры и деградацию КПД
Public Function ESP_system_calc( _
                 ByVal p_calc_atma, _
        Optional ByVal U_surf_high_lin_V As Double, _
        Optional ByVal f_surf_Hz As Double, _
        Optional ByVal power_fact_kW As Double, _
        Optional ByVal t_intake_C = 50, _
        Optional ByVal t_dis_C = 50, _
        Optional ByVal feed As String = "", _
        Optional ByVal pump_json As String, _
        Optional ByVal motor_json As String, _
        Optional ByVal cable_json As String, _
        Optional ByVal gassep_json As String, _
        Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
        Optional ByVal param As String)
' p_calc_atma        - давление для которого делается расчет
'                      либо давление на приеме насоса
'                      либо давление на выкиде насоса
'                      определяется параметром calc_along_flow
' U_surf_high_lin_V - напряжение питания
' f_surf_Hz         - фактическая частота
' power_fact_kW     - фактическое потребление энергии
' t_intake_C       - температура на приеме насоса
' t_dis_C          - температура на выкиде насоса.
'             если = 0 и calc_along_flow = 1 то рассчитывается
' feed     - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'            функцию encode_feed() для генерации
```

```
' pump_json - строка с параметрами насоса
' motor_json - строка с параметрами ПЭД
' cable_json - строка с параметрами кабеля ПЭД
' gassep_json - строка с параметрами сепарации флюида на приеме
' calc_along_flow  - режим расчета снизу вверх или сверху вниз
'          calc_along_flow = True => p_atma давление на приеме
'          calc_along_flow = False => p_atma давление на выкиде
' param     - дополнительные параметры расчета потока
' результат   - массив значений включающий
'            перепад давления
'            перепад температур
'            мощность потребляемая с вала, Вт
'            мощность гидравлическая по перекачке жидкости, Вт
'            КПД ЭЦН
'            список неполон
```

A.45. E_1

```
' Расчет интегральной показательной функции $E_1(x)$
' для вещественных положительных x, x>0 верно E_1(x)=- Ei(-x)
Function E_1(ByVal x As Double)
' x  - агрумент функции, может быть и положительным и отрицательным
' результат - значение функции
```

A.46. feed_calc

```
' функция расчета параметров потока
Public Function feed_calc( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal param As String = "")
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, С.
```

```
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'               используйте encode_feed для генерации
' param       - параметры расчета и вывода результатов
' результат   - массив всех расчетных значений,
'               с подписями во второй строке
```

A.47. feed_cJT_Katm

```
' функция расчета коэффициента Джоуля Томсона
Public Function feed_cJT_Katm( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String)
' p_atma      - давление, атм
' t_C         - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'               используйте encode_feed для генерации
' результат   - массив, значение коэффициента Джоуля Томсона потока,
'               подпись, и лог расчета если подключен
```

A.48. feed_gas_fraction_d

```
' функция расчета коэффициента Джоуля Томсона
Public Function feed_gas_fraction_d( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal ksep_add_fr As Double = 0)
' p_atma      - давление, атм
' t_C         - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'               используйте encode_feed для генерации
' ksep_add_fr - коэффициент сепарации газа из потока
' результат   - значение доли газа в потоке (расходна доля)
```

A.49. feed_mod_mix

```
' функция расчета свойств разделенного потока флюидов
Public Function feed_mod_mix( _
               ByVal feed_1 As String, _
               ByVal feed_2 As String, _
      Optional ByVal param As String = "")
' k_sep      - коэффициент сепарации газа
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' param      - параметры расчета и вывода результатов
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.50. feed_mod_separate_gas

```
' функция расчета свойст потока после сепарации газа
Public Function feed_mod_separate_gas( _
               ByVal k_sep, _
               ByVal p_atma, _
               ByVal t_C, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal param As String = "")
' k_sep      - коэффициент сепарации газа д.е., число или список
' p_atma     - давление, атм. число или список.
' t_C        - температура, С. число или список.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' param      - параметры расчета и вывода результатов
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.51. feed_mod_split

```
' функция расчета свойств разделенного потока флюидов
Public Function feed_mod_split( _
               ByVal k_sep_gas As Double, _
               ByVal k_sep_oil As Double, _
               ByVal k_sep_wat As Double, _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal param As String = "")
' k_sep_gas  - коэффициент сепарации газа
' k_sep_oil  - коэффициент сепарации газа
' k_sep_wat  - коэффициент сепарации газа
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, C.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' param      - параметры расчета и вывода результатов
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.52. feed_mu_mix_cP

```
' функция расчета плотности газо жидкостной смеси (ГЖС)
Public Function feed_mu_mix_cP( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String)
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, C.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.53. feed_p_gas_fraction_atma

```
' расчет давления при котором
' достигается заданная доля газа в потоке
Public Function feed_p_gas_fraction_atma( _
               ByVal free_gas_d As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal ksep_add_fr As Double = 0)
' free_gas_d - допустимая доля газа в потоке;
' t_C        - температура, C.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' ksep_add_fr - коэффициент сепарации газа из потока
' результат  - число - давление
```

A.54. feed_q_mix_rc_m3day

```
' функция расчета расхода газо жидкостной смеси (ГЖС)
Public Function feed_q_mix_rc_m3day( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String)
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, C.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.55. feed_rho_mix_kgm3

```
' функция расчета плотности газо жидкостной смеси (ГЖС)
Public Function feed_rho_mix_kgm3( _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String)
' p_atma     - давление, атм
' t_C        - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' результат  - массив, расход ГЖС в рабочих условиях,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.56. feed_rp_gas_fraction_m3m3

```
' расчет газового фактора
' при котором достигается заданная доля газа в потоке
Public Function feed_rp_gas_fraction_m3m3( _
               ByVal free_gas_d As Double, _
               ByVal p_atma As Double, _
               ByVal t_C As Double, _
               ByVal feed As String, _
      Optional ByVal ksep_add_fr As Double = 0)
' free_gas_d - допустимая доля газа в потоке;
' t_C        - температура, С.
' feed - параметры потока флюидов, дебит, обводненность и пр
'              используйте encode_feed для генерации
' ksep_add_fr - коэффициент сепарации газа из потока
' результат  - число - давление,
'              подпись, и лог расчета если подключен
```

A.57. GLV_p_atma

```
' функция расчета давления на входе или на выходе
' газлифтного клапана (простого) при закачке газа.
' результат массив значений и подписей
Public Function GLV_p_atma(ByVal d_mm As Double, _
                           ByVal p_calc_atma As Double, _
                           ByVal q_gas_sm3day As Double, _
                           Optional ByVal gamma_g As Double = 0.6, _
                           Optional ByVal t_C As Double = 25, _
                           Optional ByVal calc_along_flow As Boolean =
                           ↪  False, _
                           Optional ByVal p_open_atma As Double = 0, _
                           Optional ByVal calibr As Double = 1)
' d_mm           - диаметр клапана, мм
' p_calc_atma    - давление на входе (выходе) клапана, атма
' q_gas_sm3day   - расход газа, ст. м3/сут
' gamma_g        - удельная плотность газа
' t_C            - температура в точке установки клапана
' calc_along_flow - направление расчета:
'               0 - против потока (расчет давления на входе);
'               1 - по потоку (расчет давления на выходе).
' p_open_atma     - давление открытия/закрытия клапана, атм
' calibr        - коэффициент калибровки
```

A.58. GLV_q_gas_sm3day

```
' функция расчета расхода газа через газлифтный клапан/штуцер
' результат массив значений и подписей
Public Function GLV_q_gas_sm3day(ByVal d_mm As Double, _
                                 ByVal p_in_atma As Double, _
                                 ByVal p_out_atma As Double, _
                                 ByVal gamma_g As Double, _
                                 ByVal t_C As Double, _
                        Optional ByVal calibr As Double = 1)
' d_mm         - диаметр основного порта клапана, мм
' p_in_atma    - давление на входе в клапан (затруб), атма
```

```
' p_out_atma  - давление на выходе клапана (НКТ), атма
' gamma_g     - удельная плотность газа
' t_C         - температура клапана, C
```

A.59. GL_decode_string

```
'' функция расшифровки параметров газлифтной компоновки скважины
'Public Function GL_decode_string(well_GL_str As String, _
'                  Optional ByVal getStr As Boolean = False)
'' well_GL_str  - строка с параметрами газлифтной скважины
'' getStr  - флаг проверки работы функции
''    по умолчанию False (0) - функция выдает объект CESPsystem
''    если задать True - функция раскодирует строку и снова закодирует
''                       и выдаст строку (можно использовать из листа)
'' результат - объект CESPsystem
```

A.60. GL_encode_string

```
'' функция кодирования параметров работы скважины с газлифтом
'Public Function GL_encode_string( _
'                    Optional q_gas_inj_sm3day As Double = 0, _
'                    Optional p_gas_inj_atma As Double = 0, _
'                    Optional d_gas_inj_mm As Double = 0, _
'                    Optional HmesGLV_m = 0, _
'                    Optional dGLV_mm = 0, _
'                    Optional PsurfGLV_atma = 0)
'' q_gas_inj_sm3day - расход газа закачки
'' p_gas_inj_atma - давление газа закачки на поверхности
'' d_gas_inj_mm - диаметр штуцера регулировки закачки газа на
↪  поверхности
'' HmesGLV_m     - измеренные глубины установки газлифтных клапанов
'' dGLV_mm       - диаметры порта установленных газлифтных клапанов
'' PsurfGLV_atma - давления зарядки газлифтных клапанов
'' результат     - строка с закодированными параметрами
```

A.61. IPR_pi_sm3dayatm

```
' расчет коэффициента продуктивности пласта
' по данным тестовой эксплуатации
Public Function IPR_pi_sm3dayatm( _
                ByVal Qtest_sm3day As Double, _
                ByVal pwf_test_atma As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1)
' Qtest_sm3day   - тестовый дебит скважины, ст.м3/сут
' pwf_test_atma  - тестовое забойное давление, абс. атм
' p_res_atma      - пластовое давление, абс. атм
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' результат      - значение коэффициента продуктивности, ст.м3/сут/атм
```

A.62. IPR_pq_crv

```
' расчет кривой IPR в формате json
' pq_crv - кривая давление температура
Public Function IPR_pq_crv( _
                ByVal pi_sm3dayatm As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1, _
        Optional param As String = "")
' pi_sm3dayatm   - коэффициент продуктивности, ст.м3/сут/атм
' p_res_atma     - пластовое давление, абс. атм
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' param          - дополнительные параметры построения
' результат      - кривая IPR в формате json.
'        можно использовать decode_json_crv для декодирования
```

A.63. IPR_p_wf_atma

```
' расчет забойного давления по дебиту и продуктивности
Public Function IPR_p_wf_atma( _
                ByVal pi_sm3dayatm As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
                ByVal q_liq_sm3day, _
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1, _
        Optional ByVal t_res_C As Double = 80)
' pi_sm3dayatm   - коэффициент продуктивности, ст.м3/сут/атм
' p_res_atma      - пластовое давление, абс. атм
' q_liq_sm3day    - дебит жидкости скважины на поверхности, ст.м3/сут
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' t_res_C        - температура флюида в пласте, C
' результат      - значение забойного давления, абс. атм
```

A.64. IPR_q_liq_sm3day

```
' расчет дебита по давлению и продуктивности
Public Function IPR_q_liq_sm3day( _
                ByVal pi_sm3dayatm As Double, _
                ByVal p_res_atma As Double, _
                ByVal p_wf_atma, _
        Optional ByVal fw_perc As Double = 0, _
        Optional ByVal pb_atma As Double = -1, _
        Optional ByVal t_res_C As Double = 80)
' pi_sm3dayatm   - коэффициент продуктивности, ст.м3/сут/атм
' p_res_atma     - пластовое давление, абс. атм
' p_wf_atma      - забойное давление, абс. атм.
'                  можно задать список [],
'                  тогда результат будет в виде списка
' fw_perc        - обводненность, %
' pb_atma        - давление насыщения, абс. атм
' t_res_C        - температура флюида в пласте, C
```

```
' результат       - значение дебита жидкости, ст.м3/сут
'                   или список значений
```

A.65. MF_choke_calibr

```
' расчет корректирующего фактора (множителя) модели штуцера под замеры
' медленный расчет - калибровка подбирается
Public Function MF_choke_calibr( _
            ByVal feed As String, _
            ByVal d_choke_mm As Double, _
            Optional ByVal p_in_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal p_out_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal calibr_type As Integer = 0, _
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal t_choke_C As Double = 20, _
            Optional ByVal param As String = "")

' feed          - закодированная строка с параметрами потока.
' d_choke_mm     - диаметр штуцера (эффективный), мм
' p_in_atma      - давление на входе (высокой стороне)
' p_out_atma     - давление на выходе (низкой стороне)
' d_pipe_mm      - диаметр трубы до и после штуцера, мм
' t_choke_C      - температура, С.
' param         - параметры расчета json строка
' результат      - число - калибровочный коэффициент для модели.
'                   штуцера  - множитель на дебит через штуцер
```

A.66. MF_choke_calibr_fast

```
' расчет корректирующего фактора (множителя) модели штуцера под замеры
' быстрый расчет - калибровка вычисляется
Public Function MF_choke_calibr_fast( _
            ByVal feed As String, _
            ByVal d_choke_mm As Double, _
```

```
            Optional ByVal p_in_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal p_out_atma As Double = -1, _
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal t_choke_C As Double = 20, _
            Optional ByVal param As String = "")
' feed          - закодированная строка с параметрами потока.
' d_choke_mm     - диаметр штуцера (эффективный), мм
' p_in_atma      - давление на входе (высокой стороне)
' p_out_atma     - давление на выходе (низкой стороне)
' d_pipe_mm      - диаметр трубы до и после штуцера, мм
' t_choke_C      - температура, C.
' param         - параметры расчета json строка
' результат      - число - калибровочный коэффициент для модели.
'                  штуцера  - множитель на дебит через штуцер
```

A.67. MF_choke_pq_crv

```
' расчет кривой - характеристики штуцера
' pq - давление дебит
Public Function MF_choke_pq_crv( _
                    ByVal d_choke_mm As Double, _
                    ByVal feed As String, _
                    ByVal p_calc_from_atma As Double, _
           Optional ByVal t_choke_C As Double = 20, _
           Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
           Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
           Optional ByVal calibr As Double = 1, _
           Optional ByVal param As String = "")
' d_choke_mm      - диаметр штуцера (эффективный)
' feed            - закодированная строка с параметрами потока.
' p_calc_from_atma - давление с которого начинается расчет, атм
'                  граничное значение для проведения расчета
'                  либо давление на входе, либо на выходе
' t_choke_C       - температура потока, С.
' d_pipe_mm       - диаметр трубы до и после штуцера
' calc_along_flow - флаг направления расчета относительно потока
' param           - параметры расчета json строка
' результат       - число или массив значений с параметрами штуцера
'                   и давление на штуцере на расчетной стороне.
```

A.68. MF_choke_p_atma

```
' расчет давления в штуцере (дросселе)
Public Function MF_choke_p_atma( _
                    ByVal d_choke_mm As Double, _
                    ByVal feed As String, _
                    ByVal p_calc_from_atma, _
           Optional ByVal t_choke_C = 20, _
           Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
           Optional ByVal calc_along_flow As Boolean = True, _
           Optional ByVal calibr As Double = 1, _
           Optional ByVal param As String = "")
' d_choke_mm      - диаметр штуцера (эффективный)
' feed      - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'           функции encode_feed() или encode_feed_list()
' p_calc_from_atma - давление с которого начинается расчет, атм
```

```
'                   граничное значение для проведения расчета
'                   либо давление на входе, либо на выходе.
'                    может быть списком.
' t_choke_C        - температура потока, C.
'                    может быть списком.
' d_pipe_mm        - диаметр трубы до и после штуцера
' calc_along_flow - флаг направления расчета относительно потока
' param            - параметры расчета json строка
' результат        - число или массив значений с параметрами штуцера
'                    и давление на штуцере на расчетной стороне.
```

A.69. MF_choke_q_sm3day

```
' расчет давления в штуцере
Public Function MF_choke_q_sm3day( _
                     ByVal feed As String, _
                     ByVal d_choke_mm As Double, _
                     ByVal p_in_atma As Double, _
                     ByVal p_out_atma As Double, _
            Optional ByVal t_choke_C = 20, _
            Optional ByVal d_pipe_mm As Double = 70, _
            Optional ByVal calibr As Double = 1, _
            Optional ByVal param As String = "")
' feed          - закодированная строка с параметрами потока.
' d_choke_mm    - диаметр штуцера (эффективный)
' p_in_atma     - давление на входе в штуцер, атм.
'                 высокая сторона
' p_out_atma    - давление на выходе из штуцера, атм.
'                 низкая сторона
' t_choke_C     - температура потока, C.
' d_pipe_mm     - диаметр трубы до и после штуцера
' param         - параметры расчета json строка
' результат     - число - массив значений с параметрами штуцера
'                 и давление на штуцере на расчетной стороне.
```

A.70. MF_dpdl_atmm

```
'расчет градиента давления
'с использованием многофазных корреляций
Public Function MF_dpdl_atmm(ByVal d_m As Double, _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal Ql_rc_m3day As Double, _
            ByVal Qg_rc_m3day As Double, _
    Optional ByVal mu_oil_cP As Double = const_mu_o, _
    Optional ByVal mu_gas_cP As Double = const_mu_g, _
    Optional ByVal sigma_oil_gas_Nm As Double = const_sigma_oil_Nm, _
    Optional ByVal rho_lrc_kgm3 As Double = const_go_ * 1000, _
    Optional ByVal rho_grc_kgm3 As Double = const_gg_ * const_rho_air, _
    Optional ByVal eps_m As Double = 0.0001, _
    Optional ByVal theta_deg As Double = 90, _
    Optional ByVal hcorr As Integer = 1, _
    Optional ByVal param_out As Integer = 0, _
    Optional ByVal calibr_grav As Double = 1, _
    Optional ByVal calibr_fric As Double = 1)
' расчет градиента давления по одной из корреляций
' d_m - диаметр трубы в которой идет поток
' p_atma - давление в точке расчета
' Ql_rc_m3day - дебит жидкости в рабочих условиях
' Qg_rc_m3day - дебит газа в рабочих условиях
' mu_oil_cP - вязкость нефти в рабочих условиях
' mu_gas_cP - вязкость газа в рабочих условиях
' sigma_oil_gas_Nm - поверхностное натяжение
'              жидкость газ
' rho_lrc_kgm3 - плотность нефти
' rho_grc_kgm3 - плотность газа
' eps_m     - шероховатость
' theta_deg - угол от горизонтали
' hcorr  - тип корреляции
' param_out - параметр для вывода
' calibr_grav - калибровка гравитации
' calibr_fric - калибровка трения
```

A.71. MF_pipe_p_atma

```
'  расчет распределения давления и температуры в трубопроводе
'  выводит результат в виде таблицы значений
Public Function MF_pipe_p_atma( _
                ByVal p_calc_from_atma, _
                ByVal t_calc_from_C, _
        Optional ByVal construction As String = "", _
        Optional ByVal feed As String = "", _
        Optional ByVal t_model As String = "", _
        Optional ByVal calc_along_coord As Boolean = True, _
        Optional ByVal flow_along_coord As Boolean = True, _
        Optional ByVal flow_correlation As Integer = 0, _
        Optional ByVal calibr_grav As Double = 1, _
        Optional ByVal calibr_fric As Double = 1, _
        Optional ByVal param As String, _
        Optional ByVal h_start_m As Double = -10000000000#, _
        Optional ByVal h_end_m As Double = 10000000000#)
' p_calc_from_atma  - давление с которого начинается расчет, атм
'           граничное значение для проведения расчета
' t_calc_from_C - температура в точке где задано давление расчета
' feed      - параметры потока флюидов json строка. Используйте
'           функции encode_feed() или encode_feed_list()
' construction - параметры конструкции json строка. Используйте
'           функцию encode_pipe() для генерации
' t_model   - параметры температурной модели json строка.
'           Используйте функцию encode_t_model() для генерации
' calc_along_coord - направление расчета относительно координат.
' flow_along_coord - направление потока относительно координат.
' flow_correl ation - гидравлическая корреляция, номер
' calibr_grav  - калибровка на гравитационную составляющую
'                градиента давления
' calibr_fric  - калибровка на составляющую трения
'                градиента давления
' param     - дополнительные параметры расчета потока
' h_start_m - начало расчета по трубе, м
' h_end_m   - конечная точка расчета по трубе, м
' результат - число - давление на другом конце трубы atma.
'           и распределение параметров по трубе
```

A.72. PVT_bg_m3m3

```
' функция расчета объемного коэффициента газа
Public Function PVT_bg_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение объемного коэффициента газа, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
' В основе расчета корреляция для z факотора
```

A.73. PVT_bo_m3m3

```
' расчет объемного коэффициента нефти
Public Function PVT_bo_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение объемного коэффициента нефти, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
```

A.74. PVT_bw_m3m3

```
' расчет объемного коэффициента воды
Public Function PVT_bw_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение объемного коэффициента воды, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
```

A.75. PVT_calc

```
' функция расчета всех PVT свойств нефти при заданных
' давлении и температуре
Public Function PVT_calc( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String, _
            Optional ByVal param As String = "")
' p_atma   - давление, атм
' t_C      - температура, С.
' PVT_prop - статичные свойства флюида - плотности rsb и пр
'            используйте encode_PVT для генерации
' param    - набор параметров расчета в виде json строки
'
' Возвращает значения всех PVT свойств
' для заданных термобарических условий.
```

A.76. PVT_compressibility_gas_1atm

```
' расчет сжимаемости нефти
Public Function PVT_compressibility_gas_1atm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.77. PVT_compressibility_oil_1atm

```
' расчет сжимаемости нефти
Public Function PVT_compressibility_oil_1atm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.78. PVT_compressibility_wat_1atm

```
' расчет сжимаемости воды
Public Function PVT_compressibility_wat_1atm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.79. PVT_cp_gas_JkgC

```
' расчет теплоемкости газа при постоянном давлении cp
Public Function PVT_cp_gas_JkgC( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.80. PVT_cp_oil_JkgC

```
' расчет теплоемкости нефти при постоянном давлении cp
Public Function PVT_cp_oil_JkgC( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.81. PVT_cp_wat_JkgC

```
' расчет теплоемкости воды при постоянном давлении cp
Public Function PVT_cp_wat_JkgC( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma   - давление, атм
' t_C      - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.82. PVT_cv_gas_JkgC

```
' расчет теплоемкости газа при постоянном давлении cp
Public Function PVT_cv_gas_JkgC( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.83. PVT_mu_gas_cP

```
' расчет вязкости газа
Public Function PVT_mu_gas_cP( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение вязкости газа, сП
' для заданных термобарических условий.
```

A.84. PVT_mu_oil_cP

```
' расчет вязкости нефти
Public Function PVT_mu_oil_cP( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение вязкости нефти, сП
' для заданных термобарических условий.
```

A.85. PVT_mu_wat_cP

```
' расчет вязкости воды
Public Function PVT_mu_wat_cP( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение вязкости воды, сП
' для заданных термобарических условий.
```

A.86. PVT_pb_atma

```
' Расчет давления насыщения
Public Function PVT_pb_atma( _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число - давление насыщения.
```

A.87. PVT_rho_gas_kgm3

```
' расчет плотности газа в рабочих условиях
Public Function PVT_rho_gas_kgm3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число - плотность газа
'           при заданных термобарических условиях, кг/м3.
```

A.88. PVT_rho_oil_kgm3

```
' расчет плотности нефти в рабочих условиях
Public Function PVT_rho_oil_kgm3( _
```

```
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - плотность нефти
'           при заданных термобарических условиях, кг/м3.
```

A.89. PVT_rho_wat_kgm3

```
' расчет плотности воды в рабочих условиях
Public Function PVT_rho_wat_kgm3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число - плотность воды
'           при заданных термобарических условиях, кг/м3.
```

A.90. PVT_rs_m3m3

```
' расчет газосодержания
Public Function PVT_rs_m3m3( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
```

```
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение газосодержания, м3/м3
' для заданных термобарических условий.
```

A.91. PVT_salinity_ppm

```
' расчет солености воды
Public Function PVT_salinity_ppm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Возвращает значение солености воды, ppm
' для заданных термобарических условий.
```

A.92. PVT_ST_liqgas_Nm

```
' расчет коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ
Public Function PVT_ST_liqgas_Nm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
```

```
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения жидкость - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.93. PVT_ST_oilgas_Nm

```
' расчет коэффициента поверхностного натяжения нефть - газ
Public Function PVT_ST_oilgas_Nm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения нефть - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.94. PVT_ST_watgas_Nm

```
' расчет коэффициента поверхностного натяжения вода - газ
Public Function PVT_ST_watgas_Nm( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, С.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' результат - число
```

```
' Возвращает коэффициента поверхностного натяжения вода - газ, Нм
' для заданных термобарических условий.
```

A.95. PVT_z

```
' расчет коэффициента сверхсжимаемости газа
Public Function PVT_z( _
            ByVal p_atma As Double, _
            ByVal t_C As Double, _
            ByVal PVT_prop As String)
' p_atma  - давление, атм
' t_C     - температура, C.
' PVT_prop - строка с параметрами флюида,
'           используйте encode_pvt для ее генерации
'
' Результат - z фактор газа.
'           коэффициент сверхсжимаемости газа,
'           безразмерная величина
```

A.96. transient_def_cd

```
' расчет безразмерного коэффициента влияния ствола скважины
↪  (определение)
Function transient_def_cd(ByVal cs_1atm As Double, _
             Optional ByVal rw_m As Double = 0.1, _
             Optional ByVal h_m As Double = 10, _
             Optional ByVal porosity As Double = 0.2, _
             Optional ByVal ct_1atm As Double = 0.00001 _
             ) As Double
' cs_1atm     - коэффициент влияния ствола скважины, 1/атм
' rw_m        - радиус скважины, м
' h_m         - толщина пласта, м
' porosity    - пористость
```

```
' ct_1atm      - общая сжимаемость системы в пласте, 1/атм
' результат    - безразмерный коэффициент влияния ствола скважины  cd
```

A.97. transient_def_cs_1atm

```
' расчет коэффициента влияния ствола скважины (определение)
Function transient_def_cs_1atm(ByVal cd As Double, _
            Optional ByVal rw_m As Double = 0.1, _
            Optional ByVal h_m As Double = 10, _
            Optional ByVal porosity As Double = 0.2, _
            Optional ByVal ct_1atm As Double = 0.00001 _
            ) As Double
' cs_1atm      - коэффициент влияния ствола скважины, 1/атм
' rw_m         - радиус скважины, м
' h_m          - толщина пласта, м
' porosity     - пористость
' ct_1atm      - общая сжимаемость системы в пласте, 1/атм
' результат    - коэффициент влияния ствола скважины  cs
```

A.98. transient_def_pd

```
' расчет безразмерного давления (определение)
Function transient_def_pd(ByVal p_wf_atma As Double, _
                          ByVal q_liq_sm3day As Double, _
                Optional ByVal pi_atma As Double = 250, _
                Optional ByVal k_mD As Double = 100, _
                Optional ByVal h_m As Double = 10, _
                Optional ByVal mu_cP As Double = 1, _
                Optional ByVal b_m3m3 As Double = 1.2 _
            ) As Double
' p_wf_atma     - забойное давление, атма
' q_liq_sm3day - дебит запуска скважины, м3/сут в стандартных условиях
' pi_atma       - начальное пластовое давление, атма
' k_mD          - проницаемость пласта, мД
```

```
' h_m          - толщина пласта, м
' mu_cP        - вязкость флюида в пласте, сП
' b_m3m3       - объемный коэффициент нефти, м3/м3
' результат    - безразмерное время td
```

A.99. transient_def_p_wf_atma

```
' расчет безразмерного давления (определение)
Function transient_def_p_wf_atma(ByVal pd As Double, _
                         ByVal q_liq_sm3day As Double, _
                 Optional ByVal pi_atma As Double = 250, _
                 Optional ByVal k_mD As Double = 100, _
                 Optional ByVal h_m As Double = 10, _
                 Optional ByVal mu_cP As Double = 1, _
                 Optional ByVal b_m3m3 As Double = 1.2 _
             ) As Double
' p_wf_atma     - забойное давление, атма
' q_liq_sm3day - дебит запуска скважины, м3/сут в стандартных условиях
' pi_atma      - начальное пластовое давление, атма
' k_mD         - проницаемость пласта, мД
' h_m          - толщина пласта, м
' mu_cP        - вязкость флюида в пласте, сП
' b_m3m3       - объемный коэффициент нефти, м3/м3
' результат    - безразмерное время td
```

A.100. transient_def_td

```
' расчет безразмерного времени (определение)
Function transient_def_td(ByVal t_day As Double, _
             Optional ByVal rw_m As Double = 0.1, _
             Optional ByVal k_mD As Double = 100, _
             Optional ByVal porosity As Double = 0.2, _
             Optional ByVal mu_cP As Double = 1, _
             Optional ByVal ct_1atm As Double = 0.00001 _
```

```
            ) As Double
' t_day       - время для которого проводится расчет, сут
' rw_m        - радиус скважины, м
' k_mD        - проницаемость пласта, мД
' porosity    - пористость
' mu_cP       - вязкость флюида в пласте, сП
' ct_1atm     - общая сжимаемость системы в пласте, 1/атм
' результат   - безразмерное время td
```

A.101. transient_def_t_day

```
' расчет времени по безразмерному времени (определение)
Function transient_def_t_day(ByVal td As Double, _
            Optional ByVal rw_m As Double = 0.1, _
            Optional ByVal k_mD As Double = 100, _
            Optional ByVal porosity As Double = 0.2, _
            Optional ByVal mu_cP As Double = 1, _
            Optional ByVal ct_1atm As Double = 0.00001 _
            ) As Double
' t_day       - время для которого проводится расчет, сут
' rw_m        - радиус скважины, м
' k_mD        - проницаемость пласта, мД
' porosity    - пористость
' mu_cP       - вязкость флюида в пласте, сП
' ct_1atm     - общая сжимаемость системы в пласте, 1/атм
' результат   - время t
```

A.102. transient_pd_radial

```
' Расчет неустановившегося решения уравнения фильтрации
' для различных моделей радиального притока к вертикльной скважине
' основано не решениях в пространстве Лапласа и преобразовании Стефеста
Function transient_pd_radial(ByVal td As Double, _
                    Optional ByVal cd As Double = 0, _
```

```
                    Optional ByVal skin As Double = 0, _
                    Optional ByVal rd As Double = 1, _
                    Optional Model As Integer = 0)
' td          - безразмерное время для которого проводится расчет
' cd          - безразмерный коэффициент влияния ствола скважины
' skin        - скин-фактор, безразмерный skin>0.
'               для skin<0 используйте эффективный радиус скважины
' rd          - безразмерное расстояние для которого проводится расчет
'               rd=1 соответвует забою скважины
' model       - модель проведения расчета. 0 - модель линейного стока Ei
'               1 - модель линейного стока через преобразование Стефеста
'               2 - конечный радиус скважины
'               3 - линейный сток со скином и послепритоком
'               4 - конечный радиус скважины со скином и послепритоком
' результат - безразмерное давление pd
```

A.103. transient_pwf_radial_atma

```
' расчет изменения забойного давления после запуска скважины
' с постоянным дебитом (terminal rate solution)
Function transient_pwf_radial_atma(ByVal t_hr As Double, _
                                   ByVal q_liq_sm3day As Double, _
                          Optional ByVal pi_atma As Double = 250, _
                          Optional ByVal skin As Double = 0, _
                          Optional ByVal cs_1atm As Double = 0, _
                          Optional ByVal r_m As Double = 0.1, _
                          Optional ByVal rw_m As Double = 0.1, _
                          Optional ByVal k_mD As Double = 100, _
                          Optional ByVal h_m As Double = 10, _
                          Optional ByVal porosity As Double = 0.2, _
                          Optional ByVal mu_cP As Double = 1, _
                          Optional ByVal b_m3m3 As Double = 1.2, _
                          Optional ByVal ct_1atm As Double = 0.00001, _
                         Optional ByVal Model As Integer = 0) As Double
' t_hr        - время для которого проводится расчет, час
' q_liq_sm3day - дебит запуска скважины, м3/сут в стандартных условиях
' pi_atma     - начальное пластовое давление, атма
' skin        - скин - фактор, может быть отрицательным
' cs_1atm     - коэффициент влияния ствола скважины, 1/атм
```

```
' r_m          - расстояние от скважины для которого проводится расчет, м
' rw_m         - радиус скважины, м
' k_mD         - проницаемость пласта, мД
' h_m          - толщина пласта, м
' porosity     - пористость
' mu_cP        - вязкость флюида в пласте, сП
' b_m3m3       - объемный коэффициент нефти, м3/м3
' ct_1atm      - общая сжимаемость системы в пласте, 1/атм
' model       - модель проведения расчета. 0 - модель линейного стока Ei
'               1 - модель линейного стока через преобразование Стефеста
'               2 - конечный радиус скважины
'               3 - линейный сток со скином и послепритоком
'               4 - конечный радиус скважины со скином и послепритоком
' результат -  давление pwf
```

A.104. unf_version

```
' функция возвращает номер версии Унифлок VBA
Public Function unf_version() As String
```

A.105. well_ksep_natural_d

```
' расчет натуральной сепарации газа на приеме насоса
Public Function well_ksep_natural_d( _
             ByVal feed As String, _
             ByVal p_intake_atma, _
    Optional ByVal t_intake_C = 50, _
    Optional ByVal d_intake_mm As Double = 90, _
    Optional ByVal d_cas_mm As Double = 120)
' feed           - закодированные параметры потока флюидов
' p_intake_atma - давление сепарации
' t_intake_C     - температура сепарации
' d_intake_mm    - диаметр приемной сетки
```

```
' d_cas_mm       - диаметр эксплуатационной колонны
' результат      - число - естественная сепарация
```

A.106. well_ksep_total_d

```
' расчет общей сепарации на приеме насоса
Public Function well_ksep_total_d( _
        ByVal SepNat, _
        ByVal SepGasSep As Double)
' SepNat         - естественная сепарация
' SepGasSep      - искусственная сепарация (газосепаратор)

    Dim sep_nat
    Dim i As Integer
    Dim c As New Collection

    sep_nat = parse_list(SepNat)
    If UBound(sep_nat) - LBound(sep_nat) + 1 = 1 Then
        well_ksep_total_d = SepNat + (1 - SepNat) * SepGasSep
    Else
        For i = LBound(sep_nat) To UBound(sep_nat)
            c.Add sep_nat(i) + (1 - sep_nat(i)) * SepGasSep
        Next i
        well_ksep_total_d = ConvertToJson(c)
    End If
End Function
```