

С.И. Кудряшов

# ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РЕГЛАМЕНТА ВЫВОДА НА РЕЖИМ ПОГРУЖНОЙ УСТАНОВКИ С ВЕНТИЛЬНЫМ ПРИВОДОМ

*В настоящее время в литературе слабо освещены закономерности теплообмена при нестационарном режиме работы УЭЦН. Косвенным следствием этого факта является то, что документы, регламентирующие работу установки в нестационарном режиме (например, регламент вывода скважины на режим), проработаны недостаточно полно.*

Так, в [1] время непрерывной ПЭД, при отсутствии необходимого притока скважины ( $T_{до п}$ ), не зависит от глубины спуска УЭЦН, т.е. от температуры горных пород, окружающих установку, а регламентируется следующим образом.

УЭЦН с ПЭД мощностью до 32 кВт (включительно) – не более двух часов;

УЭЦН с ПЭД мощностью более 32 кВт, до 45 кВт (включительно) – не более одного часа;

УЭЦН с ПЭД мощностью более 45 кВт – не более 30 минут.

Если принять, что регламент ориентирован на максимально возможную глубину спуска УЭЦН, то учет зависимости  $T_{до п}$  от действительной глубины спуска может исключить технологические паузы (или уменьшить их количество). Это обстоятельство положительным образом скажется как на ресурсных показателях ПЭД, так и на эффективности нефтедобычи.

Таким образом, развитие методик определения закономерностей теплообмена в системе “скважина - погружная установка” при нестационарном режиме, позволяющих формулировать физические предпосылки для построения регламентов вывода УЭЦН на рабочий режим, является актуальной задачей.

Упомянутая задача приобретает особую актуальность в условиях перехода к интенсивным способам добычи нефти и расширенного внедрения компактных высокоэффективных вентиляционных двигателей в качестве привода УЭЦН (установки серии ЦУНАР).

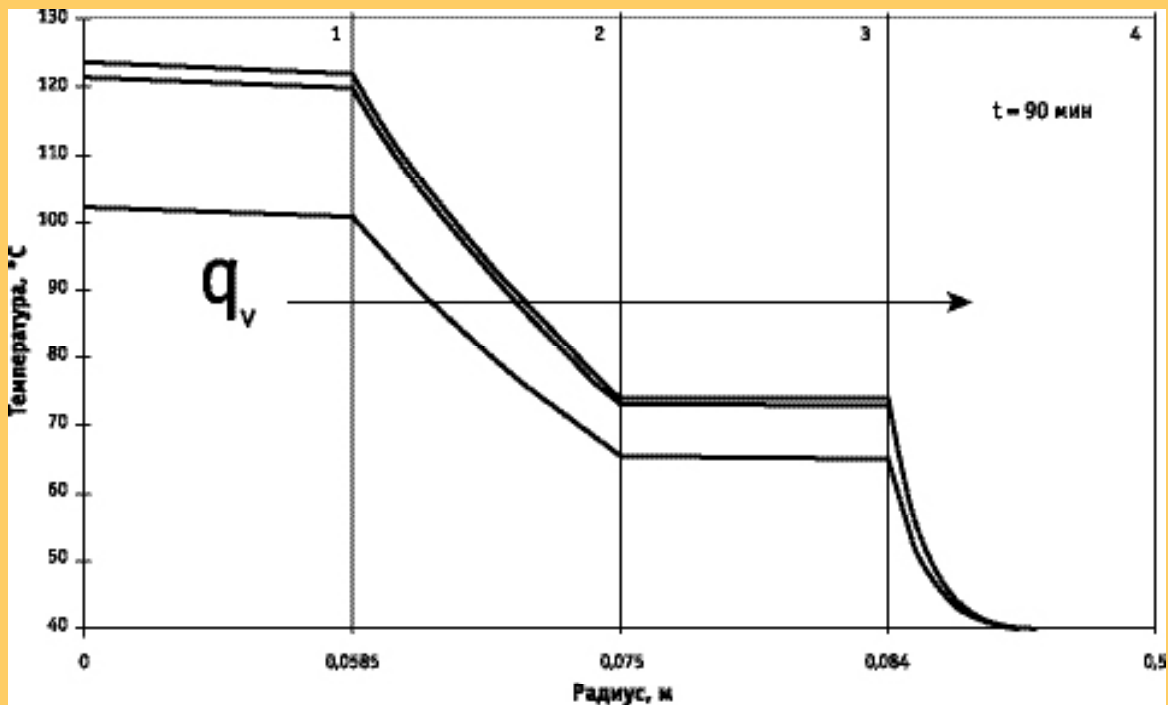
## ПРОТОТИП РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

При выводе погружной насосной установки на режим проток жидкости между корпусом двигателя и внутренней поверхностью колонны отсутствует. Теплота от поверхности ПЭД к поверхности обсадной колонны отво-

дится молекулярной теплопроводностью естественной конвекцией.

В работе [2] принято, что в случае откачки жидкости глушения (вода) конвективным переносом теплоты можно пренебречь. Механизм отвода теплоты от поверхности двигателя допустимо рассматривать в виде нестационарного процесса молекулярной теплопроводности через цилиндрические стенки: вода между двигателем и колонной, колонна и цилиндрическая область горных пород, на внешнюю границу которой не проникают тепловые возмущения.

Оценим правомерность таких допущений. В работе [3] представлены данные по интенсивности конвективного теплообмена для вертикальных и горизонтальных плоских щелей, кольцевых и сферических слоев, заполненных газом или жидкостью. Сложный процесс конвективного переноса теплоты через щели заменяется эквивалентным процессом теплопроводности, который определяется коэффициентом



**Рис. 1.** Расчетный профиль температуры в двигателе (1), жидкости глушения (2), эксплуатационной колонне (3) и горных породах (4) для ПЭД различной мощности.

$$\varepsilon = \lambda_{\text{экв}} / \lambda$$

где  $\lambda_{\text{экв}}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности, учитывающий конвективный перенос теплоты;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества, заполняющего щель.

Величина  $\varepsilon$  является функцией комплекса  $Gr \times Pr$ , где  $Gr$  и  $Pr$  – критерии Грасгофа и Прандтля, соответственно. При построении данных критериев за определяющий размер принимается толщина прослойки, а за определяющую температуру – средняя температура жидкости. В случае

$$Gr \times Pr < 10^3$$

$\varepsilon = 1$ , и допущения работы [79] можно считать адекватными. В противном случае необходимо учитывать конвективную составляющую, например, используя обобщающее соотношение Михеева [3,4].

$$\varepsilon = 0,18 \times (Gr \times Pr)^{0,25}$$

На рис. 3 приведен профиль температуры в двигателе, жидкости глушения, эксплуатационной колонне и горных породах, рассчитанный в [2] для ПЭД16-117МВ5, ПЭД45-117МВ5 и ПЭДС90-117МВ5 (кривые снизу вверх, соответственно). В расчетах были приняты следующие теплофизические свойства элементов модели:

1

двигатель –  
 $a = 1,25 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ ,  $\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$ ;

вода –  
 $a = 0,16 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$ ,  $\lambda = 0,65 \text{ Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$ ;

колонна –  
 $a = 0,25 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ ,  $\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$ ;

горные породы –  
 $a = 0,986 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ ,  $\lambda = 1,66 \text{ Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$ .

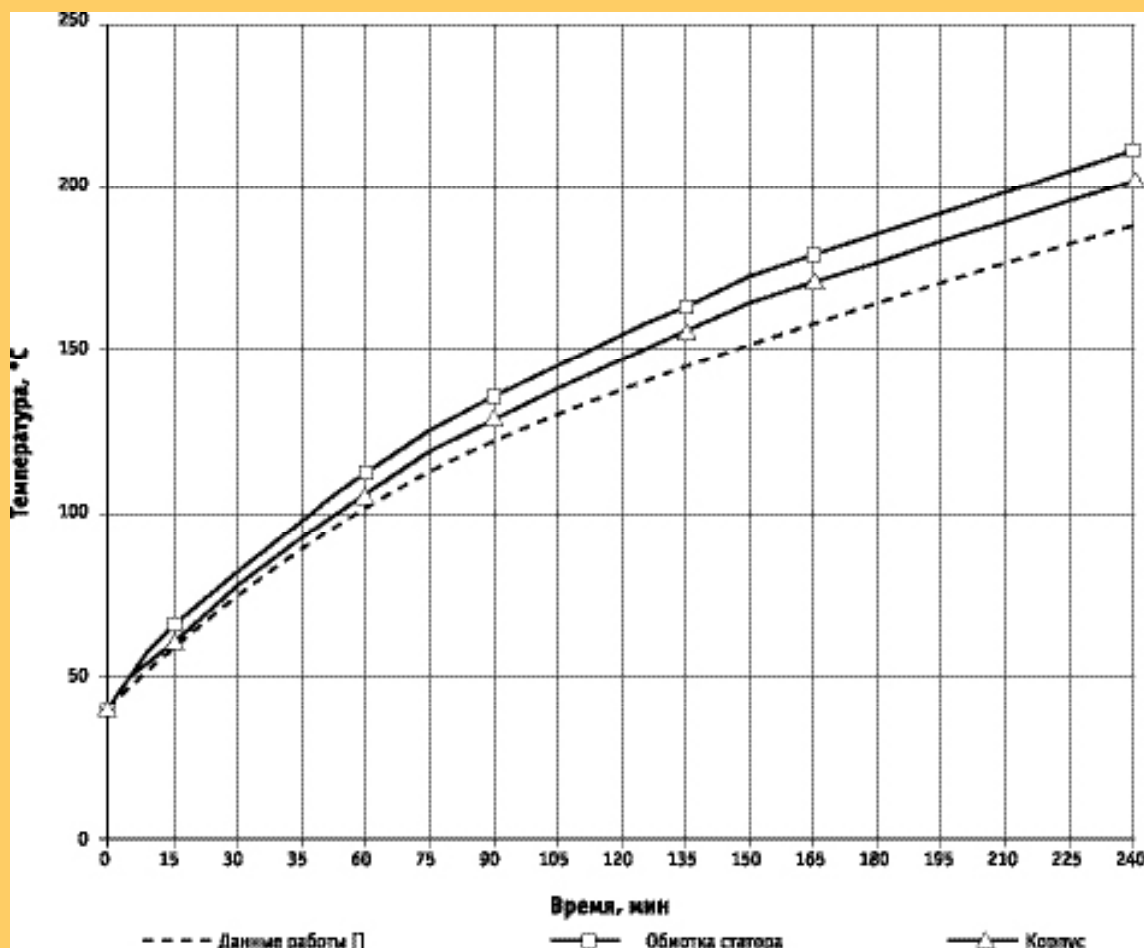
2

Величина радиуса удаленной зоны пласта, не подверженной влиянию теплового поля ПЭД, согласно рекомендациям [7], выбиралась равной 0,5 м. Температура горных пород на глубине спуска установки принималась равной 40°C.

3

Из рисунка 1 видно, что на расчетный момент времени (90 мин) температуры поверхности двигателя и колонны составляют ~ 120°C и ~ 75°C соответственно. Тогда, для средней температуры воды  $t_{\text{ср}} = (120+75)/2 = 97,5^\circ\text{C}$  и давления на глубине спуска УЭЦН 10 мПа, характерного для режима откачки, из [5] имеем:

температурный коэффициент объемного расширения  
 $\beta = 7,23 \times 10^{-4}, [1/^\circ\text{C}]$ ;



**Рис. 2.** Апробация разработанной расчетной методики путем сравнения с результатами [2] в сопоставимых условиях

кинематический коэффициент вязкости  
 $\nu = 0,306 \times 10^{-6}, [м^2/сек]$  ;

критерий Прандтля  
 $Pr = 1,8$  .

Перепад температуры между средней температурой жидкости и поверхностями двигателя и колонны

$$\Delta t = (120 - 97,5) = (97,5 - 75) = 22,5^{\circ}C \quad 4$$

Тогда для принятой в рассматриваемом примере геометрии

$$Gr = 9,8 \times \beta \times \Delta t \times h^3 / \nu^2 = [9,8 \times 7,23 \times 10^{-4} \times 22,5 \times (0,0165)^3] / (0,306 \times 10^{-6})^2 = 7,64 \times 10^6 \quad 5$$

Таким образом, приведенные оценки показывают, что в расчетный момент времени эквивалентный коэффициент теплопроводности на порядок превышает принятый в рас-  
 $\varepsilon = 0,18 \times (Gr \times Pr)^{0,25} = 0,18 \times (7,64 \times 10^6 \times 1,8)^{0,25} = 11$

$$\lambda_{эКВ} = \varepsilon \times \lambda = 11 \times \lambda$$

четной модели, т.е. возможность пренебрежения конвективной составляющей переноса теплоты является не совсем очевидной.

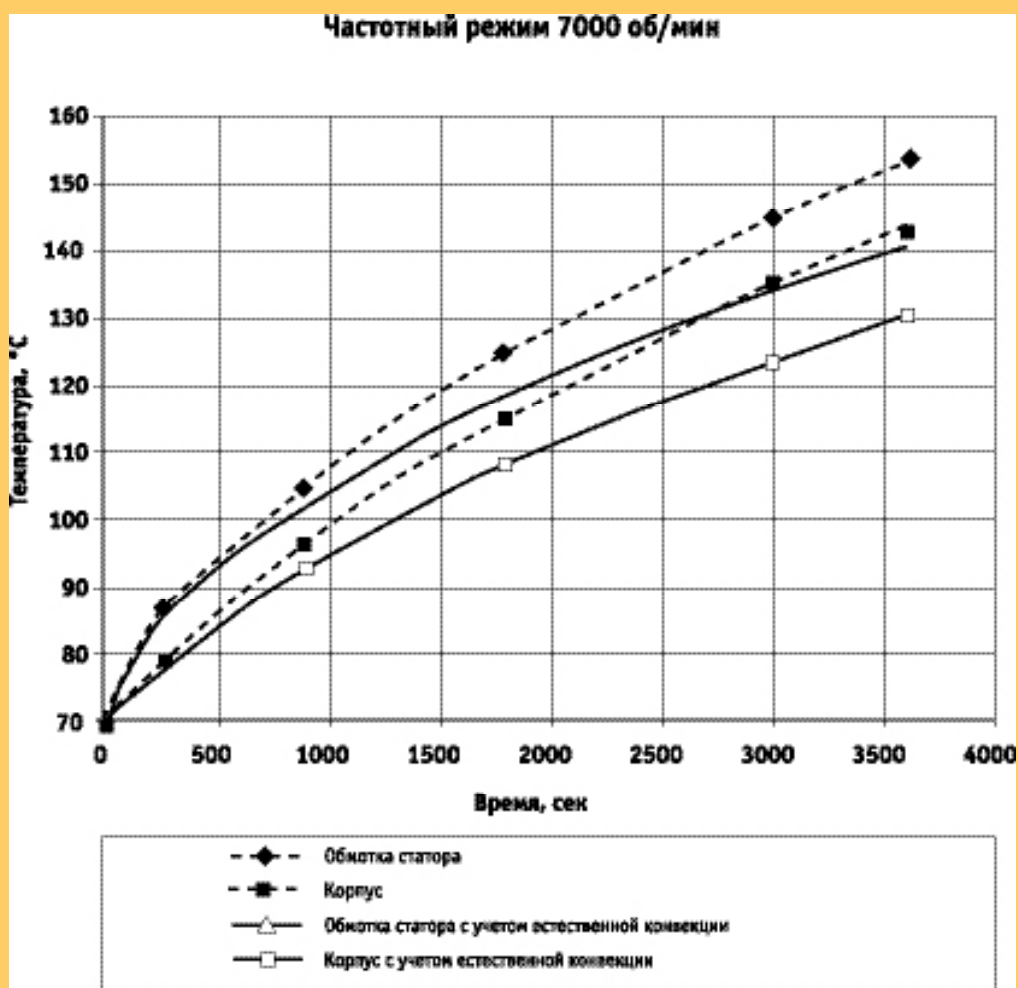
С другой стороны, в начальный период вывода скважины на режим разность температур между поверхностями двигателя и колонны незначительна. Это существенно снижает величину  $\lambda_{эКВ}$  соответственно уменьшает эквивалентный коэффициент теплопроводности, что делает принятые в [2] зависимости более корректными.

Безусловная ценность расчетов, проведенных в [2], состоит в том, что они являются хорошей "жесткой" оценкой

реального процесса. Наличие конвективного переноса теплоты между поверхностями двигателя и колонны не сужит допустимые временные диапазоны, в которых может

6

7



**Рис. 3.** Влияние конвективной составляющей переноса теплоты на динамику изменения температуры элементов вентильного двигателя

работать ПЭД в процессе вывода скважины на режим.

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

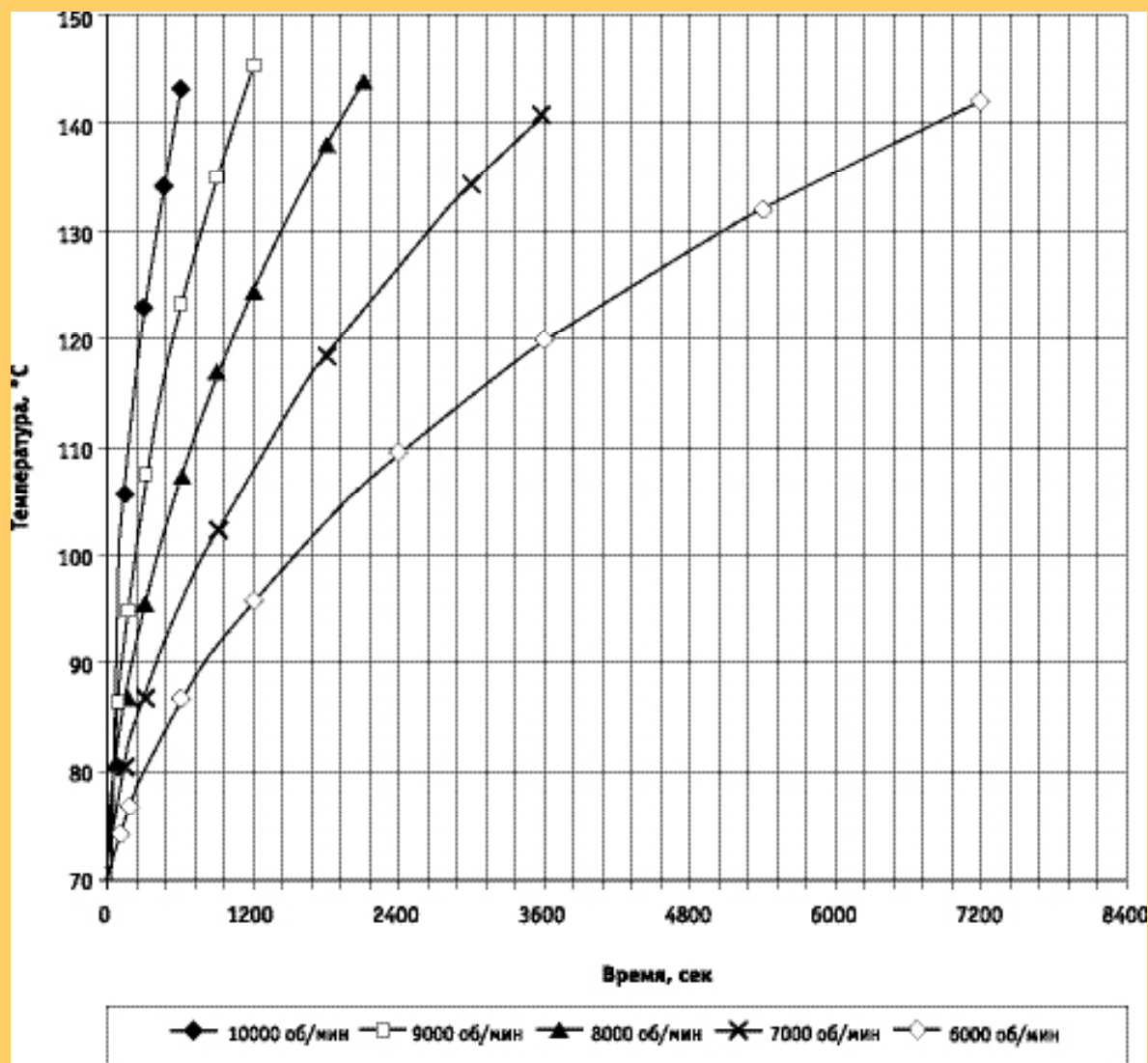
Структурно предлагаемая расчетная модель совпадает с моделью, предложенной в [2]. Отличие состоит в том, что двигатель моделируется не изотропным цилиндром, а разбивается на элементы, как это сделано в [6]. Принимается, что жидкость, заполняющая пространство между корпусом и колонной, имеет эквивалентный коэффициент теплопроводности, который учитывает конвективный перенос теплоты, что при неизменной плотности и удельной теплоемкости жидкости равнозначно соответствующему изменению коэффи-

циента температуропроводности. Эквивалентный коэффициент теплопроводности рассчитывается по текущим температурам корпуса двигателя и колонны. Объемы жидкости колонны и горных пород разбиваются на элементы (коаксиальные цилиндры), температура которых определяется из балансовых соотношений на основе температурного поля в предыдущий момент времени.

Для проверки адекватности применяемой методики было проведено сопоставление данных, полученных в ее рамках, с данными [2]. На рис. 2 показаны представленные в [2] данные по динамике изменения средней температуры ПЭД45-117МВ5 (внутренний диаметр колонны 150 мм, внешний 168 мм, температура горных пород на глубине спуска установки

40°С, охлаждающая жидкость- вода). Там же приведены результаты аналогичных расчетов для вентильного двигателя, частотные и энергетические параметры работы которого выбирались таким образом, чтобы удельная объемная мощность тепловых источников (в расчетный момент времени) равнялась соответствующей мощности ПЭД45-117МВ5- 122,2 кВт/м<sup>3</sup> (определение  $qv$  вентильного двигателя проводилось с учетом объема дополнительной системы охлаждения). Так, например, для расчетного момента времени 240 минут частота принималась равной 6770 об/мин, а мощность на валу двигателя 12,8 кВт.

Кроме того, для создания одинаковых условий сопоставления в расчетной модели конвективный перенос тепло-



**Рис. 4.** Динамика изменения температуры обмотки статора вентильного ПЭД при отсутствии вынужденной конвекции в зазоре между корпусом двигателя и обсадной колонной с внутренним диаметром 150 мм. Температура горных пород на уровне спуска установки 70°С.

ты между поверхностями двигателя и колонны не учитывался и отсутствовало оребрение корпуса вентильного двигателя и теплообменника дополнительной системы охлаждения.

Достаточно хорошее совпадение результатов проведенных расчетов и данных [2] свидетельствует об адекватности разработанной расчетной методики.

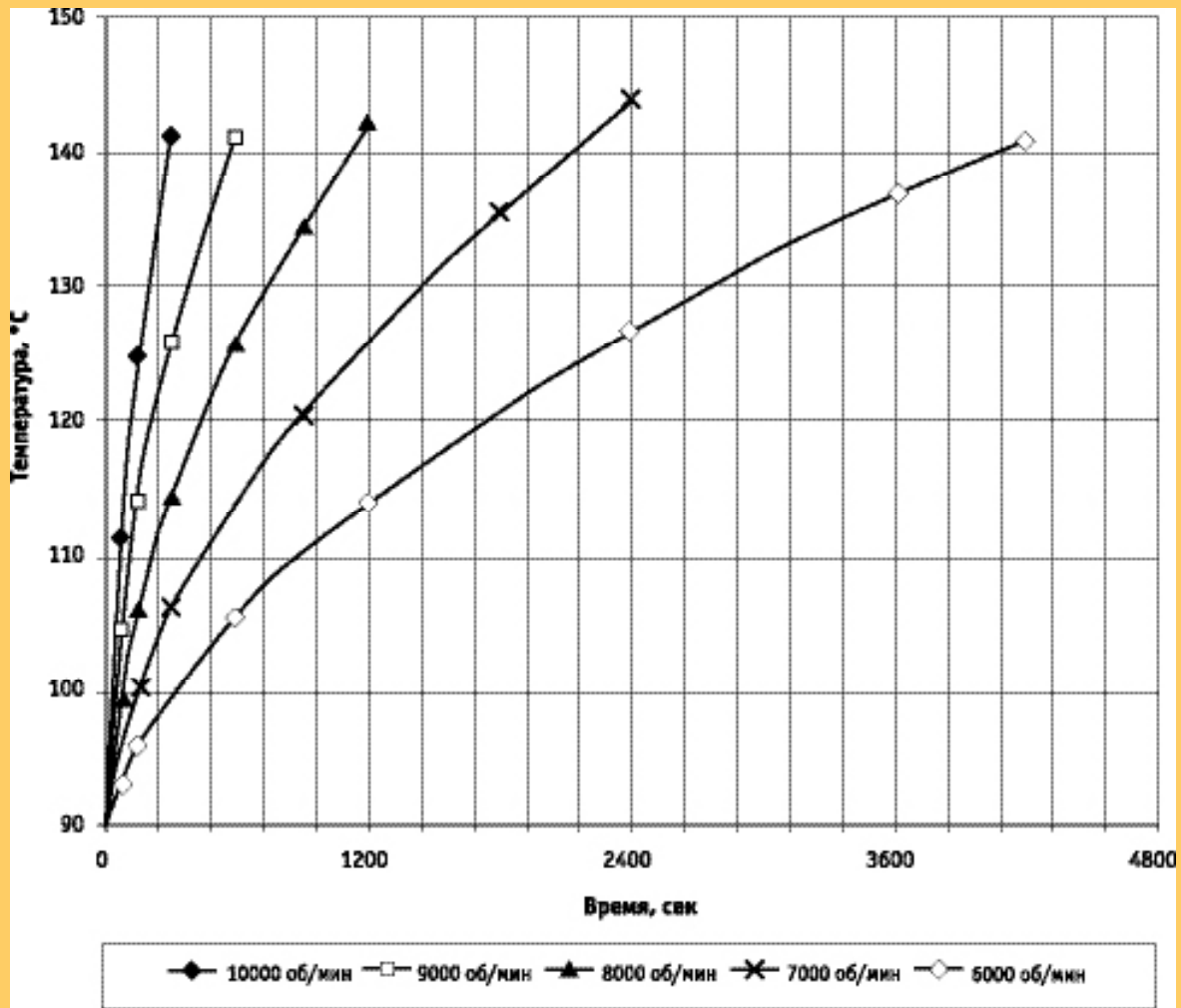
Небольшое расхождение результатов может быть обусловлено тем, что внешний диаметр корпуса ПЭД45-117МВ5 равен 117 мм, а соответствующие размеры корпуса вентильного

двигателя и теплообменника дополнительной системы охлаждения (без оребрения) равны 103 мм. Это обстоятельство приводит к тому, что для случая вентильного двигателя увеличивается толщина низкотеплопроводного слоя жидкости между колонной и ПЭД, что обуславливает повышение температурного уровня последнего.

Разработанная расчетная методика автоматически учитывает зависимость величины энергетических потерь в ПЭД от его температурного уровня в отличие от [2], где принимается  $q_v = \text{const}$ . Сказанное выше также служит

причиной повышения расчетной температуры вентильного двигателя по отношению к расчетному температурному уровню ПЭД работы [2].

На рис.3 представлены данные, иллюстрирующие влияние конвективной составляющей переноса теплоты на динамику изменения температуры элементов вентильного двигателя. Из рисунка видно, что результаты расчетов соответствуют качественным оценкам, приведенным выше. В начальный период времени (до 500 сек) перенос теплоты осуществляется только молекулярной теплопроводностью. С тече-



**Рис. 5.** Динамика изменения температуры обмотки статора вентильного ПЭД при отсутствии вынужденной конвекции в зазоре между корпусом двигателя и обсадной колонной с внутренним диаметром 150 мм. Температура горных пород на уровне спуска установки 90°C .

нием времени интенсивность конвективного переноса теплоты увеличивается, что снижает температуру элементов двигателя (например, через час отмеченное снижение превышает 10°C). Понятно, что с увеличением частотного режима работы двигателя отмеченное влияние конвективного переноса будет возрастать.

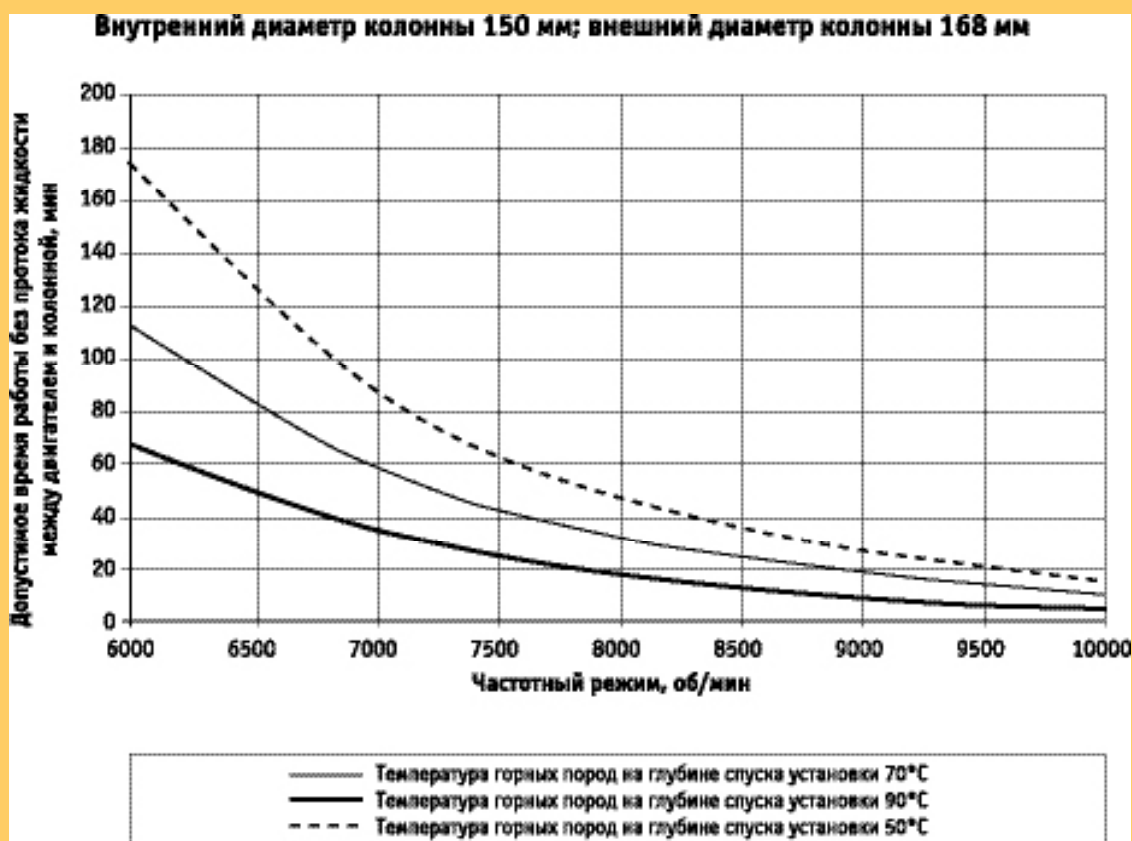
### Номограммы допустимого времени работы вентильного двигателя без протока охлаждающей жидкости

На рисунках 4–5 представлены результаты расчетов динамики изменения температуры обмотки статора вентильного двигателя, работающего в колонне с внутренним диаметром 150 мм и внешним диаметром 168 мм, для частотного диапазона (6000–10000) об/мин. Рассмотрены случаи температуры горных пород на уровне спуска установки 70°C и 90°C. Жидкость в зазоре между двигателем и колонной - вода. Для всех частотных режимов мощность на валу двигателя соответствует подаче погружного насоса 60 м<sup>3</sup>/сутки.

Самым теплонапряженным элементом погружного двигателя является обмотка статора, которая выполнена

из обмоточных теплостойких проводов с эмалево-пленочной и пленочной полиимидно-фторпластовой изоляцией. Согласно ТУ 16-705.159-80 эти провода могут эксплуатироваться при температуре до 200°C. В этой связи наиболее уязвимым (в температурном смысле) является масло, заполняющее двигатель. Применяемое электроизоляционное масло для погружных насосов МДПН согласно ТУ 38. 401177-96 имеет температуру вспышки (определяемую в открытом тигле) не ниже 160°C. Для относительно короткого времени вывода скважины на режим достаточно жестким будет верхнее ограничение температурного уровня 140°C.





**Рис. 6.** Номограмма допустимого времени работы вентильного двигателя без протока охлаждающей жидкости.

В рамках этого ограничения, данные, представленные на рис. 4 и 5, позволяют построить номограммы допустимого времени работы вентильного двигателя без протока охлаждающей жидкости.

Такая номограмма для рассматриваемой колонны представлена на рис. 6.

Представленная на рис. 6 номограмма построена для мощности на валу ПЭД, соответствующей подаче насоса 60 м<sup>3</sup>/сут для реализуемого частотного режима. В реальном процессе вывода скважины на режим мощность на валу двигателя будет изменяться по мере увеличения динамического уровня. Разработанная расчетная методика позволяет производить соответствующую коррекцию номограммы в зависимости от статического динамического уровня и геометрии эксплуатационной колонны.

## ВЫВОДЫ

1. При расчетах необходимо учитывать конвективную составляющую в процессе переноса теплоты от поверхности погружного двигателя к поверхности колонны.
2. Разработанная методика позволяет провести расчет динамики изменения температуры элементов погружного вентильного двигателя в процессе вывода скважины на режим.
3. Построены номограммы допустимого времени работы вентильного двигателя без протока охлаждающей жидкости в зазоре между поверхностями ПЭД и эксплуатационной колонны, которые могут быть использованы для построения алгоритмов вывода скважины на режим.

## Литература

1. Технологический регламент по запуску, выводу на режим и эксплуатации скважин, оборудованных УЭЦН (16-ЮНГ-СТП-Р 03-22).
2. Шмидт С.А. Исследование нестационарной работы системы "пласт-скважина-УЭЦН". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Самара, СГТУ, 2000.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1975.
4. Михеев М.А. Основы теплопередачи. - М.: Госэнергоиздат, 1956.-392 с.
5. Вукалович М.П., Рискин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во стандартов, 1969, 408 с.
6. Матвеев С.Н. Повышение эффективности работы УЭЦН на нефтепромыслах ОАО "СУРГУТНЕФТЕГАЗ" за счет применения частотного регулирования вентильного двигателя. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Москва, 2002.
7. Проселков Ю.М. Теплопередача в скважинах. - М.: Недра, 1975.-224 с.



# Гипронг – Эком



Консалтинг в вопросах обеспечения  
подготовки месторождений к разработке

Полный комплект лицензий  
на все виды деятельности

## Наши проекты:

Обустройство месторождений  
и нефтепроводы внешнего  
транспорта нефти  
Потанай-Картопольское  
Славинское  
Песчаное  
Восточно-Пальяновское  
Каменная (Юго-Восточная часть)  
Рославльское  
ЦГИС "Каменское"  
ЦПС Крапивинского месторождения

Установка переработки нефти  
Талинское месторождение (300 тыс. т/год)  
В с.Казанском (10 тыс. т/год)  
Тарко-Салинская (20 тыс. т/год)



Весь комплекс  
проектно-изыскательных работ  
по обустройству нефтяных  
и газовых месторождений,  
включающего в себя все системы  
жизнеобеспечения месторождений.  
Проектирование малотоннажных  
нефтеперерабатывающих установок.



ГИПРОНГ-ЭКОМ

г.Тюмень, ул.Республики, 59, каб.414

Тел.: (3452) 49-41-12, Факс: (3452) 46-68-42

e-mail: surovets@glprong.ru

