Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXУ1, 1981 г.

УДК 622.24.08:538.421.1

АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ БУРЕНИИ-ПЛАВЛЕНИИ ЛЬДА ПАРОВЫМ КОНДЕНСАТОРОМ

Б.Б.КУДРЯШОВ, Г.Н.СОЛОВЬЕВ

Разработка высокопроизводительного термобурового снаряда для скоростной проходки „сухих" скважин с отбором керна в снежно-фирновых и ледовых отложениях [I, 2], основанного на использовании водяного пара в качестве промежуточного теплоносителя по принципу „разомкнутой" паровой трубки [5], вызывает необходимость найти аналитическое выражение сложного теплообмена между конденсирующимся паром и ледовым забоем с учетом экранирующего действия пленки конденсата толщиной Δ внутри пустотелого кольцевого конденсатора и прослойки талой воды толщиной δ, непрерывно образующейся под его рабочим торцом в процессе бурения-плавления.

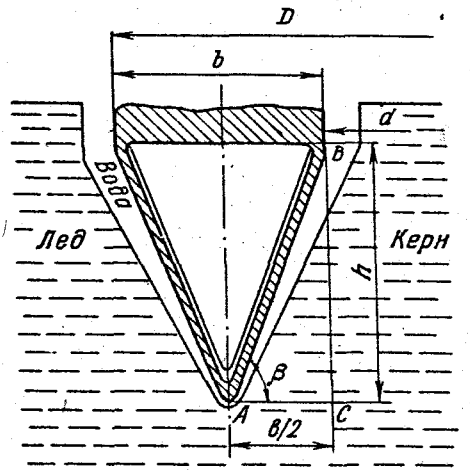


Рис.1. Радиальное сечение кольцевой коронки-конденсатора к выводу исходных зависимостей

Будем рассматривать кольцевой пустотелый конденсатор, радиальное сечение которого - равнобедренный треугольник высотой h (рис.I). Верхний торец радиальной шириной b теплоизолирован и в теплообмене не участвует. Талая вода после выдавливания из-под торца коронки и конденсат, образующийся внутри нее, принудительно выносятся специальными устройствами системы отсоса. Будем считать задачу одномерной, а процесс бурения-плавления установившимся, когда поле температур в движущейся системе координат, связанной с коронкой-конденсатором, является стационарным [3].

Количество тепла, передаваемого от пара к внутренней поверхности коронки-конденсатора, выразим как

$$Q_K = \alpha F \Delta t \,, \qquad (I)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С); F - площадь коронки-конденсатора, м^2; Δt - перепад температуры в пленке конденсата, °С.

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара через пленку конденсата без учета ее толщины Δ при наклонной стенке конденсатора в соответствии с рекомендациями акад. М.А.Михеева [4] определяется зависимостью

$$\alpha = 0{,}943 \sqrt[4]{\sin\beta \frac{\Psi \rho g \lambda^3}{\nu h \Delta t}} \,, \qquad (2)$$

где Ψ - теплота плавления льда, Дж/кг; β - угол наклона стенки конденсатора от горизонтали, град; ρ - плотность, кг/м^3; λ - коэффициент теплопроводности Вт/(м·°С); ν - коэффициент кинематической вязкости конденсата при средней температуре пленки, м^2/с; g - ускорение свободного падения, м/с^2; h - высота конденсатора по вертикали, м.

Поскольку основными конструктивными параметрами кольцевой коронки-конденсатора являются его внутренний диаметр d, высота h и радиальная ширина b, выразим через них другие параметры, необходимые для дальнейших построений. Из рис.I, в частности, из треугольника ABC, в условиях пренебрежения толщиной стенки конденсатора следует:

длина стороны радиального сечения конденсатора

$$l = \sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}} \,, \qquad (3)$$

синус угла наклона рабочей поверхности конденсатора

$$\sin\beta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}}} \,, \qquad (4)$$

средний диаметр кольцевой коронки-конденсатора

$$D_{ср} = d + b \,, \qquad (5)$$

рабочая площадь конденсатора (приближенно)

$$F = 2\pi (d+b) \sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}} \,, \qquad (6)$$

площадь кольцевого забоя (приближенно)

$$f = \pi (d+b) b \,. \qquad (7)$$

В процессе бурения-плавления на контакте лед-конденсатор всегда присутствует прослойка талой воды, толщина которой δ определяется гидравлическими сопротивлениями при выдавливании воды из-под торца.

Механическое давление (осевая нагрузка), отнесенное к площади забоя и зависящее от веса снаряда, будет уравновешиваться гидравлическим давлением, которое можно выразить с помощью формулы Дарси-Вейсбаха:

$$p = \lambda_0 \frac{\rho_в w^2}{2 d_э} s, \qquad (8)$$

где p - удельное давление, Па; λ_0 - безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; $\rho_в$ - плотность талой воды на забое, кг/м^3; w - средняя по сечению щелевого канала скорость движения выдавливаемой талой воды, м/с; $d_э$ - эквивалентный диаметр щелевого канала, м; s - длина канала потока, м.

Для упрощения задачи можно пренебречь изменением давления и толщины водяной прослойки по длине l щелевого канала. Будем считать, что в точке с координатой l/r водяная прослойка имеет толщину δ и через соответствующее сечение кольцевого щелевого канала шириной δ в единицу времени переходит четвертая часть воды, образующейся в процессе плавления льда, что наиболее просто позволяет оценить гидравлическое давление в прослойке талой воды.

При указанных условиях для характерной длины щелевого канала справедливо выражение

$$s = \frac{l}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}}. \qquad (9)$$

Поскольку внешний и внутренний щелевые каналы имеют разные периметры, в качестве среднего примем периметр, определяемый средним диаметром кольцевого конденсатора по формуле (5).

В этом случае площадь сечения кольцевого щелевого канала

$$f_0 = \pi(d + b)\delta \qquad (10)$$

и смоченный периметр

$$\Pi = 2\pi(d + b). \qquad (11)$$

Эквивалентный диаметр для канала любой конфигурации равен отношению учетверенной площади к смоченному периметру. В нашем случае

$$d_э = \frac{4 f_0}{\Pi} = 2\delta. \qquad (12)$$

При оговоренных выше условиях средняя по сечению щелевого канала скорость движения выдавливаемой талой воды определится соотношениями

$$w = \frac{f v}{4 f_0} = \frac{b v}{4\delta}, \qquad (13)$$

где v - скорость бурения-плавления, м/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления движению талой воды в щелевом канале в условиях всегда имеющего место ламинарного потока определим по формуле Стокса для кольцевого канала [4]:

$$\lambda_0 = \frac{96}{Re} = \frac{96\nu}{w d_э} = 48 \frac{\nu}{w\delta}, \qquad (14)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости талой воды при средней температуре под рабочим торцом коронки-конденсатора, м^2/с.

Подставив в формулу (8) найденные выражения для λ_0, w, $d_э$ и s, выразив удельное давление p как отношение веса снаряда P к площади кольцевого забоя, вычисленной по формуле (7), и решив относительно толщины водяной прослойки, после численных преобразований получим

$$\delta=\sqrt[3]{1{,}5\pi\rho_в\nu(d+b)\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}\,\frac{v}{P}}\ . \qquad (15)$$

где P – вес термобурового снаряда в скважине, Н.

Тепловой поток, проходящий через прослойку талой воды от торца коронки-конденсатора в лед, можно выразить следующим образом:

$$Q=\frac{\lambda_в}{\delta}\ (t_т-t_{агр})F.$$

Считая $t_{агр}$ = 0 °С,

$$Q=\frac{\lambda_в}{\delta}t_т F\ , \qquad (16)$$

где $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности талой воды в прослойке, Вт/(м·°С); $t_т$ – температура торца коронки-конденсатора, °С.

Этот тепловой поток расходуется на плавление льда

$$Q_{пл}=\psi_л\rho_л f v \qquad (17)$$

и создание температурного поля в массиве льда впереди движущегося забоя. В условиях установившегося режима бурения-плавления это можно выразить [3] зависимостью

$$Q_л=(t_{0гр}-t_л)\frac{\lambda_л}{Q_л}Fv$$

или, считая $t_{агр}$ = 0 °С и раскрывая $a_л=\frac{\lambda_л}{c_л\rho_л}$,

$$Q_л=t_л c_л \rho_л F v\ . \qquad (18)$$

Здесь $\rho_л$ – плотность льда, кг/м^3; $a_л$ – коэффициент температуропроводности льда, м^2/с; $\lambda_л$ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·°С); $c_л$ – удельная массовая теплоемкость льда, Вт/(кг·°С).

Приравнивая уравнение (16) и сумму выражений (17) и (18) и решая относительно толщины водяной прослойки, получим

$$\delta=\frac{2\lambda_в t_т\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}}{\left(\psi b-2t_л c_л\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}\right)\rho_л v}\ . \qquad (19)$$

Имея теперь для δ два независимых выражения (15) и (19), приравниваем их

$$\sqrt[3]{1{,}5\pi\nu\rho(d+b)b^2\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}\,\frac{v}{P}}=\frac{2\lambda_в t_т\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}}{\rho_л\left(r_л b-2t_л c_л\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}\right)v}\ . \qquad (20)$$

В уравнении (20) отсутствует тепловая мощность конденсатора. Поскольку $t_т$ есть температура рабочей поверхности конденсатора, нужно выразить $t_т$ через α. Для этого воспользуемся следующими соображениями. Количество тепла, передаваемого от пара к внутренней поверхности конденсатора, или его тепловая мощность, выражается [4] формулой

$$Q=\alpha(t_S-t_{ст})F, \tag{21}$$

где t_S - температура насыщения водяного пара, °С; $t_{ст}$ - температура внутренней стенки конденсатора, °С.

То же количество тепла передается через стенку конденсатора:

$$Q=\frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}}(t_{ст}-t_т)F, \tag{22}$$

где $\lambda_{ст}$ - теплопроводность материала стенки конденсатора, Вт/(м·°С); $\delta_{ст}$ - толщина стенки конденсатора, м.

Из формул (20) и (21) получим

$$t_т=t_S-\left(\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}+\frac{1}{\alpha}\right)\frac{Q}{F}. \tag{23}$$

Величину Q можно представить как сумму количеств тепла, передаваемого забою и затраченного на нагрев воды. Но тогда в выражение (23) для $t_т$ попадет толщина водяной прослойки δ под торцом коронки конденсатора, которая, в свою очередь, выражается весьма сложной зависимостью. Поэтому выразим тепловую мощность конденсатора Q как сумму количеств тепла, затраченного в единицу времени на нагрев воды в водяной прослойке $Q_в$, тепла на плавление льда $Q_л$ и тепла на образование температурного поля $Q_п$:

$$Q=Q_в+Q_л+Q_п. \tag{24}$$

Учитывая малую толщину водяной прослойки, будем считать распределение температуры в ней прямолинейным. Поэтому в качестве средней температуры в пленке можно принять среднее арифметическое между температурой торца $t_т$ и температурой агрегатного перехода $t_{агр}$. На этом основании для тепла, затрачиваемого на подогрев воды в прослойке, справедливо выражение

$$Q_в=c\rho\frac{t_т+t_{агр}}{2}fv,$$

или при $t_{агр}=0$ °С

$$Q_в=c\rho t_т fv. \tag{25}$$

Подставляя в уравнение (24) выражения (17), (18), (21), (24), принимая во внимание соотношения (6) и (7) и решая относительно температуры торца, получим

$$t_т=\frac{t_S-\left(\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}+\frac{1}{\alpha}\right)\left(\psi_л\frac{b}{2\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}}-t_л c_л\right)\rho_л v}{1+\frac{1}{2}\left(\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}}+\frac{1}{\alpha}\right)c\rho\frac{b}{2\sqrt{h^2+\frac{b^2}{4}}}v}. \tag{26}$$

Подставляя выражение (26) в уравнение (20) и решая его относительно скорости бурения, окончательно получим

$$v = \frac{\lambda_в [t_s - k(m\psi_л - t_л c_л)\rho_л v]}{\rho_л (1 + 0{,}5 m k c_в \rho_в v)(m\psi_л - t_л c_л)} \sqrt[3]{\frac{2mP}{n\nu_в \rho_в v}}, \qquad (27)$$

где $m = \frac{b}{2\sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}}}$; $n = 1{,}5\pi(d+b)b^3$; $k = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha}$.

Трансцендентное уравнение (27) позволяет методом итерации (последовательных приближений) на ЭВМ проследить влияние на скорость бурения-плавления всех основных определяющих процесс параметров: температуры конденсации пара, теплофизических свойств и температуры льда, конструктивных размеров коронки-конденсатора, свойств материала и веса парового термобурового снаряда. Кроме того, выражение (27) дает возможность получить расчетные формулы для определения любого из параметров при заданных значениях остальных.

По формуле (27) проведены расчеты на ЭВМ „Одра" при следующих средних исходных данных: пар t_s = 100 °С; конструктивные параметры коронки-конденсатора – d = 0,08 м; b = 0,01 м; h = 0,03 м; $\delta_{ст}$ = 0,001 м; $\lambda_{ст}$ = 14,5 Вт/(м·°С); вес снаряда P = 1000 Н; параметры льда – $\rho_л$ = 920 кг/м^3; $c_л$ = 2094 Дж/(кг·°С); $\lambda_л$ = 2,25 Вт/(м·°С); ψ = 3,35·10^5 Дж/кг; $t_л$ = -30 °С.

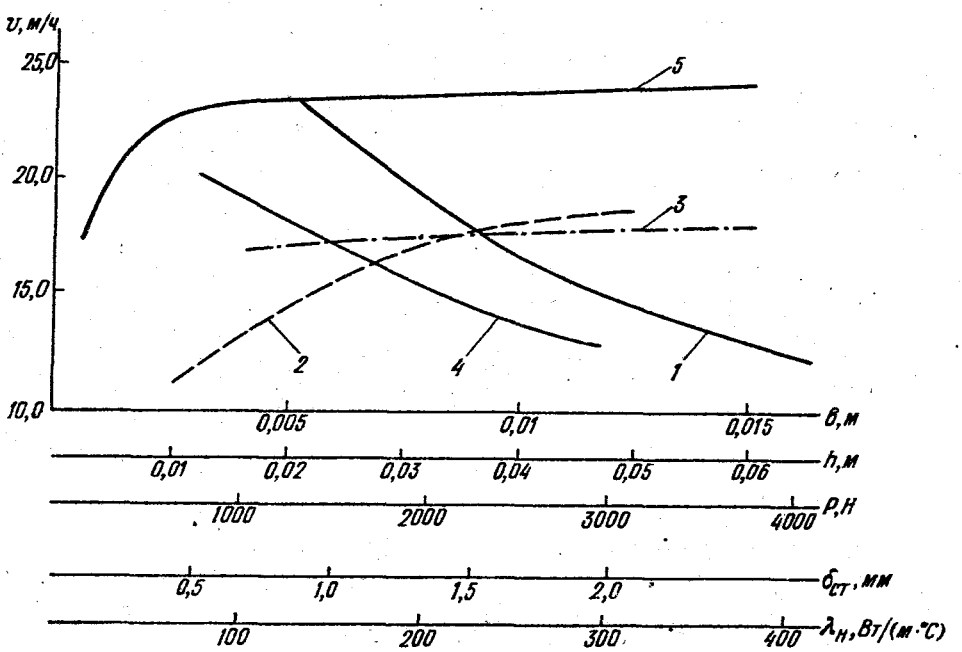


Рис.2. Расчетные зависимости скорости бурения-плавления:
1 – от ширины конденсатора, 2 – от высоты конденсатора, 3 – от веса снаряда, 4 – от толщины стенки конденсатора, 5 – от теплопроводности материала конденсатора

Параметры конденсата и талой воды принимались при средней температуре по данным М.В.Михеева и И.М.Михеевой [4].

Результаты расчетов представлены на рис.2. Они показывают хорошее совпадение с опытными данными [I] и свидетельствуют о перспективности разработки парового термоэлектробура для бурения „сухих" скважин в снежно-фирновых и ледовых отложениях, в особенности в условиях внутриконтинентальных научных походов в Антарктиде, когда требуются высокие скорости бурения-плавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов Б.Б., Соловьев Г.Н. Экспериментальная проверка способа бурения-плавления с использованием фазовых переходов промежуточного теплоносителя. Методика и техника разведки. Сборник научных трудов. Л., изд. ВИТР, 1977, № 14.

2. Кудряшов Б.Б., Соловьев Г.Н., Коваленко В.И. и др. Устройство для бурения скважин во льду с отбором керна. Авт. свидетельство № 564419. Бюлл. № 25 от 16 марта 1977.

3. Кудряшов Б.Б., Фисенко В.Ф. К теории бурения-плавления снежно-фирновых отложений и льдов Антарктиды. - В кн. Доклады межвед. комис. АН СССР по изучению Антарктики, М., Наука, 1973, вып. 12.

4. Михеев М.В., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., Энергия, 1977.

5. Соснин В.Я., Федоров В.Н. Аналитическое и экспериментальное исследование тепломассопереноса в высокотемпературных тепловых трубках. - Труды МЭИ, М., изд. МЭИ, 1972, вып. 141.