

© Г.В. БАХМАТ, А.А. КИСЛИЦЫН, У.Ю. ШАСТУНОВА

gennadiy.bakhmat@gmail.com

УДК 622.69 (075.8)

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ РЕЗЕРВУАРА ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО ОБЪЕМОМ 20 000 м³

АННОТАЦИЯ. Получены теоретические зависимости изменения температуры воды при гидравлических испытаниях резервуара вертикального стального объемом 20 000 м³ от скорости ветра при различных отрицательных температурах окружающей среды и производительностях закачки воды в резервуар. Определены рекомендуемые расходы при проведении гидравлических испытаний резервуаров в зимнее время.

SUMMARY. Theoretical dependences of change of water temperature are received at hydraulic tests of the tank vertical steel by volume 20 000 m³ from speed of a wind at various negative ambient temperatures and speed of water delivery in the tank. Recommended expenses are defined at carrying out of hydraulic tests of tanks during winter time.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Резервуар вертикальный стальной, гидравлические испытания в зимнее время, коэффициент теплообмена, характерное время.

KEY WORDS. Vertical steel reservoir, hydraulic tests during winter time, heat exchange coefficient, characteristic time.

Технологический процесс перекачки нефти предполагает наличие большого объема резервуарных емкостей. Самым распространенным типом резервуаров для хранения нефтепродуктов является вертикальный стальной цилиндрический резервуар (далее — РВС). Стандарты и единые руководящие документы для нефтяных организаций рекомендуют проводить гидравлические испытания резервуаров при температуре окружающего воздуха не ниже 5°C [1], однако существует необходимость выполнения таких испытаний в зимнее время. При проведении гидравлических испытаний резервуаров в условиях низких температур существует опасность застывания воды в испытуемом резервуаре, как во время заполнения, так и во время последующего выстаивания. Особенно это характерно для Западной Сибири, где действие низких температур усиливается влиянием ветра.

Поэтому при испытаниях резервуаров при температуре ниже 0°C должна быть разработана программа испытаний, предусматривающая мероприятия по предотвращению замерзания воды в трубах, задвижках, а также обмерзания стенки резервуара [2]. Важно оценить количество тепла, которое потребуется для поддержания теплового баланса резервуара, и, если это необходимо, рассчитать мощность подогревателя.

Испытание резервуаров проводят после окончания всех работ по монтажу и контролю, перед присоединением к резервуару трубопроводов и после завершения работ по обвалованию.

Основными видами нагрузок при гидравлических испытаниях являются испытание на гидравлическое давление, обусловленное высотой налива и плотностью испытательной жидкости (для всех типов резервуаров), и избыточное давление, избыточное разрежение в газовом пространстве (при испытании РВС).

Гидравлическое испытание следует проводить наливом воды на проектный уровень залива продукта или до уровня контрольного отверстия, которое предусмотрено для ограничения высоты наполнения резервуара. Налив воды следует осуществлять ступенями по поясам с промежутками времени, необходимыми для выдержки и проведения контрольных осмотров.

При обнаружении течи из-под края днища, появления мокрых пятен на поверхности, свищей или трещин в стенке резервуара необходимо прекратить испытание, слить воду установить и устранить причину течи.

Резервуар считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в течение указанного времени на поверхности стенки или по краям днища не появляются течи и если уровень воды не снижается.

Методика расчета температуры воды при гидравлических испытаниях. Рассмотрим резервуар вертикальный стальной для нефти и нефтепродуктов, объемом 20 000 м³ (типовой проект 701-1-60 РВС-20000).

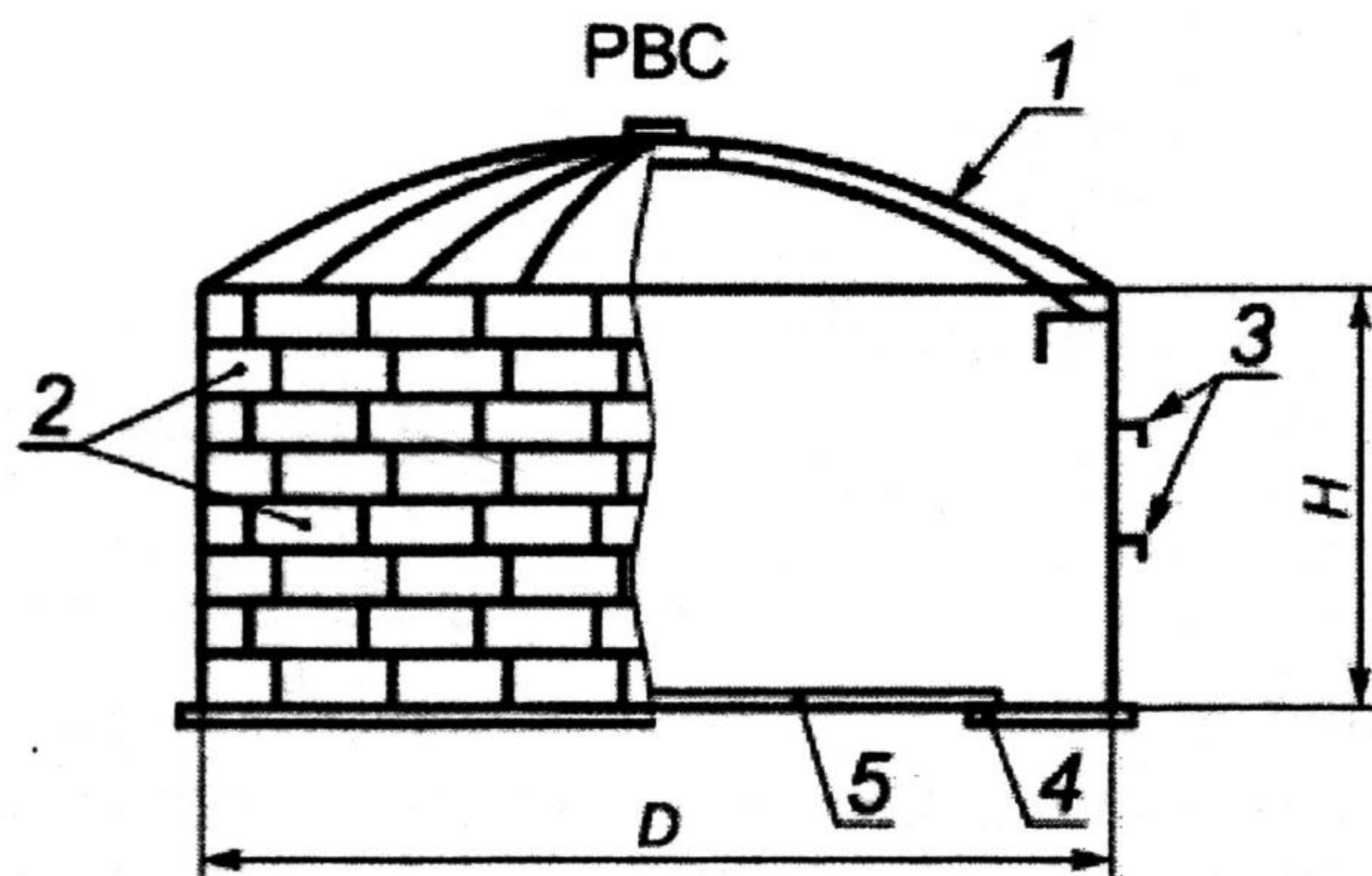


Рис. 1. Резервуар вертикальный стальной: 1 — каркас крыши; 2 — пояса стенки; 3 — промежуточные кольца жесткости; 4 — кольцо окраек; 5 — центральная часть днища

Наполнение (опорожнение) резервуара РВС должно осуществляться с производительностью подачи воды не более 500 м³/час [2].

Температура подаваемой воды составляет от 4° С до 40° С [2].

Испытания резервуаров следует проводить по следующим этапам, представленным в табл. 1.

Таблица 1

**Этапы проведения испытаний резервуаров
(при производительности подачи воды 500 м³/час)**

№ этапа	Виды работ	Время выдержки	Время заполнения, час	Высота заполнения, м Объем воды, закачан- ный на данном этапе, м ³
1	Заполнение резервуара на 50% от максимального испытательного уровня и осмотр	1 час	19,45	5,96/ 9728,49

Окончание табл. 1

2	Заполнение резервуара на 75% от максимального испытательного уровня и осмотр	2 часа	9,73	8,94/ 4864,25
3	Заполнение резервуара на 90% от максимального испытательного уровня и осмотр	3 часа	5,84	10,73/ 2921,82
4	Заполнение резервуара до максимального испытательного уровня и осмотр с выполнением замеров	$V_{рез} = 1000 \text{ м}^3$ 24 часа; $V_{рез} > 10000 \text{ м}^3$ $V_{рез} \leq 20000 \text{ м}^3$ 48 часов; $V_{рез} > 20000 \text{ м}^3$ 72 часа	3,88	11,92/ 1942,44
ИТОГО:		54	38,9	19457
5	Опорожнение резервуара до 90% от максимального испытательного уровня, создание избыточного давления на 25% выше проектного;	30 мин		
6, 7	Опорожнение резервуара до 50%, до 10 ... 15% от максимального уровня (осмотр);			
8	Полное опорожнение резервуара (осмотр, выполнение замеров)			

При назначении времени выдержки на каждом этапе испытания должна учитываться интенсивность и форма осадки основания в соответствии с требованиями СНиП 2.09.03-85* «Сооружения промышленных предприятий».

При любом тепловом расчете основополагающим уравнением является уравнение теплового баланса, которое в данном случае имеет вид:

$$G \cdot \rho \cdot c \cdot (T^0 - T) \cdot dt - kt \cdot S (T - T_0) \cdot dt = (V_0 \cdot \rho c + G \cdot t \cdot r \cdot c + m_0 c_0) dT, \quad (1)$$

где G — скорость закачки (производительность подачи воды), $\text{м}^3/\text{с}$; $G \cdot t \cdot \rho$ — масса закачиваемой воды, кг; V_0 — объем воды в резервуаре, находящийся в момент начала данного этапа закачки, м^3 ; m_0 — масса пустого резервуара, кг; c, c_0 — теплоемкости воды и материала резервуара (стали), $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$; $S = S_{\text{дна}} + S_{\text{кровли}} + S_{\text{бок. стены}}$ — площадь поверхности резервуара, м^2 ; t — текущее время, с; k — коэффициент теплообмена от резервуара в окружающую среду через стенки, днище и кровлю резервуара, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; T_0 — начальная температура подаваемой воды при закачке, К ; T — текущее значение температуры воды в резервуаре в данный момент времени, К ; T_0 — температура окружающей среды, К .

В уравнении теплового баланса (1) не учтены возможные фазовые переходы, происходящие внутри резервуара во время гидравлических испытаний в зимнее время.

Так как число Релея $Ra = Gr \cdot Pr > 10^3$, то при проведении гидравлических испытаний внутри резервуара будет наблюдаться свободное перемешивание воды, поэтому температуру воды в каждый момент времени можно считать одинаковой по всему объему резервуара.

Преобразуем уравнение (1) к удобному для интегрирования виду. Для этого произведем замену: $t_0 = \frac{m_0 c_0}{G \cdot \rho \cdot c}$ — характерное время; $t_1 = \frac{V_0}{G}$ — время, в течение которого будет производиться заполнение; $k = \frac{k_i S}{G \cdot \rho \cdot c}$ — безразмерный коэффициент теплообмена; $\tau' = \frac{t}{t_0}$ — текущее безразмерное время; $\tau' = \frac{t_1}{t_0}$ —

безразмерное время, необходимое для заполнения резервуара на очередной уровень.

В результате замены уравнение (1) принимает вид:

$$(T_e - T)d\tau - k(T - T_0)d\tau = (\tau + \tau' + 1)dT \quad (2)$$

Разделяя переменные в уравнении (2), получаем:

$$\frac{dT}{(T_e - T) - k(T - T_0)} = \frac{d\tau}{\tau + \tau' + 1} \quad (3)$$

Интегрируя это уравнение, получаем закон изменения температуры воды во время заполнения резервуара

$$T_{\text{кон}} = \frac{T_e + k \cdot T_0}{k + 1} - \frac{(\tau' + 1)^{k+1} \cdot (T_e + k \cdot T_0 - T_k \cdot (k + 1))}{(k + 1) \cdot (1 + \tau + \tau')^{k+1}} \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет определить температуру воды в любой момент времени в процессе закачки при проведении гидравлических испытаний любого резервуара. Пользуясь этим уравнением, можно при заданной температуре определить время, в течение которого температура изменится от начальной до допустимой при различных скоростях закачки и объема резервуара.

Рассмотрим случай, когда происходит наполнение пустого резервуара. Это значит, что в уравнении (2) $\tau' = 0$, при разделении переменных уравнение (2) принимает вид:

$$\frac{dT}{(T_e - T) - k(T - T_0)} = \frac{d\tau}{\tau + 1} \quad (5)$$

Интегрируя (5), получаем закон изменения температуры воды при заполнении пустого резервуара

$$T_{\text{кон}} = \frac{T_e + k \cdot T_0}{k + 1} - \frac{T_e - T_0}{(k + 1) \cdot (1 + \tau)^{k+1}} \quad (6)$$

Процесс охлаждения воды при этапе гидравлических испытаний выстаивания может быть описан, исходя из уравнения теплового баланса (1), составленного для заполненного резервуара:

$$-k_i \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = (V_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 c_0) dT \quad (7)$$

В уравнении вместо времени заполнения резервуара появляется время выстывания t' . Кроме того, объем воды и площадь теплопередачи не изменяется. Закон изменения температуры воды в этом случае может быть записан в виде

$$T_{\text{кон}} = T_0 + (T_n - T_0) \cdot e^{\frac{-t'}{k}}, \quad (8)$$

где T_n — температура воды после заполнения резервуара, К,

$$k = \frac{(V_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0)}{k_i \cdot S} = \frac{t' + t_0}{k}$$

Уравнение (8) представляет собой выражение, аналогичное известной формуле В.Г. Шухова для охлаждения резервуара [3].

В уравнениях (4), (6), (8) T_0 определяется по формуле [4]

$$T_0 = \frac{S_{\text{грунта}} \cdot T_{\text{грунта}} + S_{\text{возд}} \cdot T_{\text{возд}}}{S}, \quad (9)$$

где $S_{\text{грунта}}$ — поверхность резервуара, соприкасающаяся с грунтом (площадь дна), м², $T_{\text{грунта}}$ — температура грунта, находящегося в контакте с резервуаром, К; $S_{\text{возд}}$ — поверхность резервуара, соприкасающаяся с воздухом, м², H — высота стенки резервуара, м;

$$k_i = \frac{k_{\text{дн}} \cdot S_{\text{дн}} + k_{\text{ст.г.}} \cdot S_{\text{ст.г.}} + k_{\text{ст.ж.}} \cdot S_{\text{ст.ж.}} + k_{\text{кр}} \cdot S_{\text{кр}}}{S}, \quad (10)$$

где $k_{\text{дн}}$, $k_{\text{ст.г.}}$, $k_{\text{ст.ж.}}$, $k_{\text{кр}}$ — коэффициенты теплопередачи через днище, стенку в области газового и жидкого пространства, кровли резервуара, Вт/м·К [4];

Коэффициент теплообмена *через днище* емкости, установленной на фундаменте, находится по следующей зависимости [4]:

$$k_{\text{дн}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{дн}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\pi \cdot \delta_{\text{бетон}}}{8\lambda_{\text{грунта}}}}, \quad (11)$$

где δ_i , λ_i — толщина и теплопроводность стальной стенки днища резервуара, изоляции и т.д.; $\alpha_{1\text{дн}}$ — коэффициент теплообмена конвекцией от теплоносителя через днище емкости.

Коэффициенты теплообмена α_1 , α_2 , α_3 определяются в соответствии с видом конвекции по известным критериальным уравнениям, указанным в [5].

Коэффициент теплообмена *через стенку в области газового пространства* находим по формуле:

$$k_{\text{ст.г.}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{ст.г.}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{2\text{ст.г.}} + \alpha_{3\text{ст.г.}}}}, \quad (12)$$

где $\alpha_{1\text{ст.г.}}$ — коэффициент теплообмена от теплоносителя к вертикальной стенке емкости; $\alpha_{2\text{ст.г.}}$, $\alpha_{3\text{ст.г.}}$ — коэффициенты теплообмена от стенки резервуара в об-

ласти газового пространства к окружающей среде за счет вынужденной (создаваемой скоростью ветра) и свободной конвекции.

Коэффициент теплообмена *через стенку в области жидкости*

$$k_{ст.ж.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1ст.ж.}} + \frac{\delta_{ст.}}{\lambda_{ст.}} + \frac{1}{\alpha_{2ст.ж.} + \alpha_{3ст.ж.}}}, \quad (13)$$

где $\alpha_{1ст.ж.}$ — коэффициент теплообмена вынужденной конвекции от теплоносителя к вертикальной стенке резервуара, создаваемый потоком воды; $\alpha_{2ст.ж.}$, $\alpha_{3ст.ж.}$ — коэффициенты теплообмена от стенки резервуара в области жидкости к окружающей среде за счет вынужденной (создаваемой скоростью ветра) и свободной конвекции.

Коэффициент теплообмена *через кровлю* находится по формуле:

$$k_{кр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1кр}} + \frac{h_{газ.пр.}}{\lambda_{эке}} + \frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}} + \frac{1}{\alpha_{2кр} + \alpha_{3кр}}}, \quad (14)$$

$\alpha_{1кр}$ — коэффициент теплообмена от зеркала теплоносителя в газовое пространство резервуара (за счет свободной конвекцией) [4], $h_{газ.пр.}$ — высота газового пространства; $\lambda_{эке}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности смеси.

Результаты моделирования. В результате проведенных теплофизических расчетов был получен график изменения температуры воды при проведении гидравлических испытаний в зимнее время. Рассмотрим подробно начальный этап и этапы заполнения и выстаивания воды.

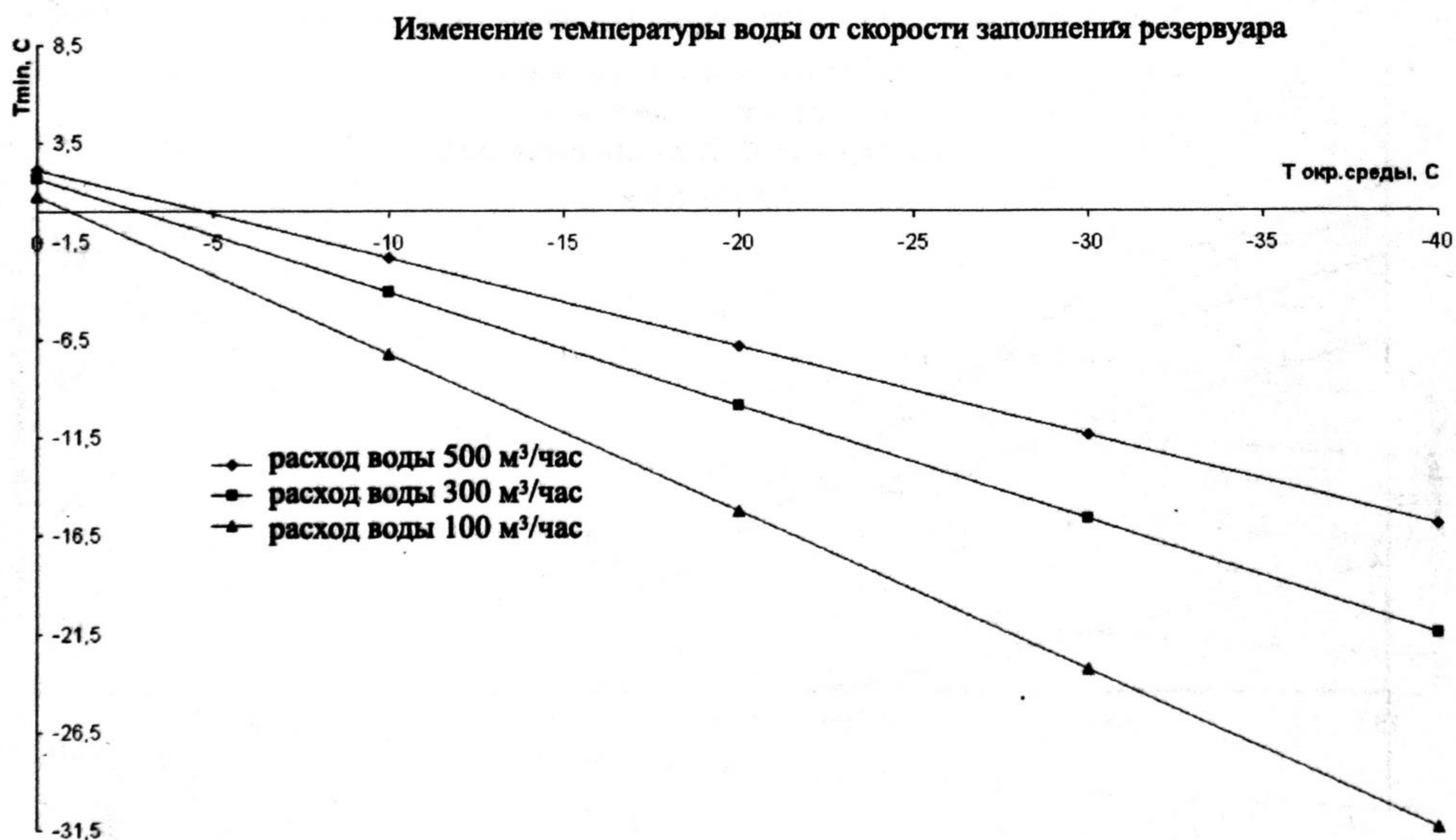


Рис. 2. Зависимость минимальной температуры воды от температуры окружающей среды в начальный период времени

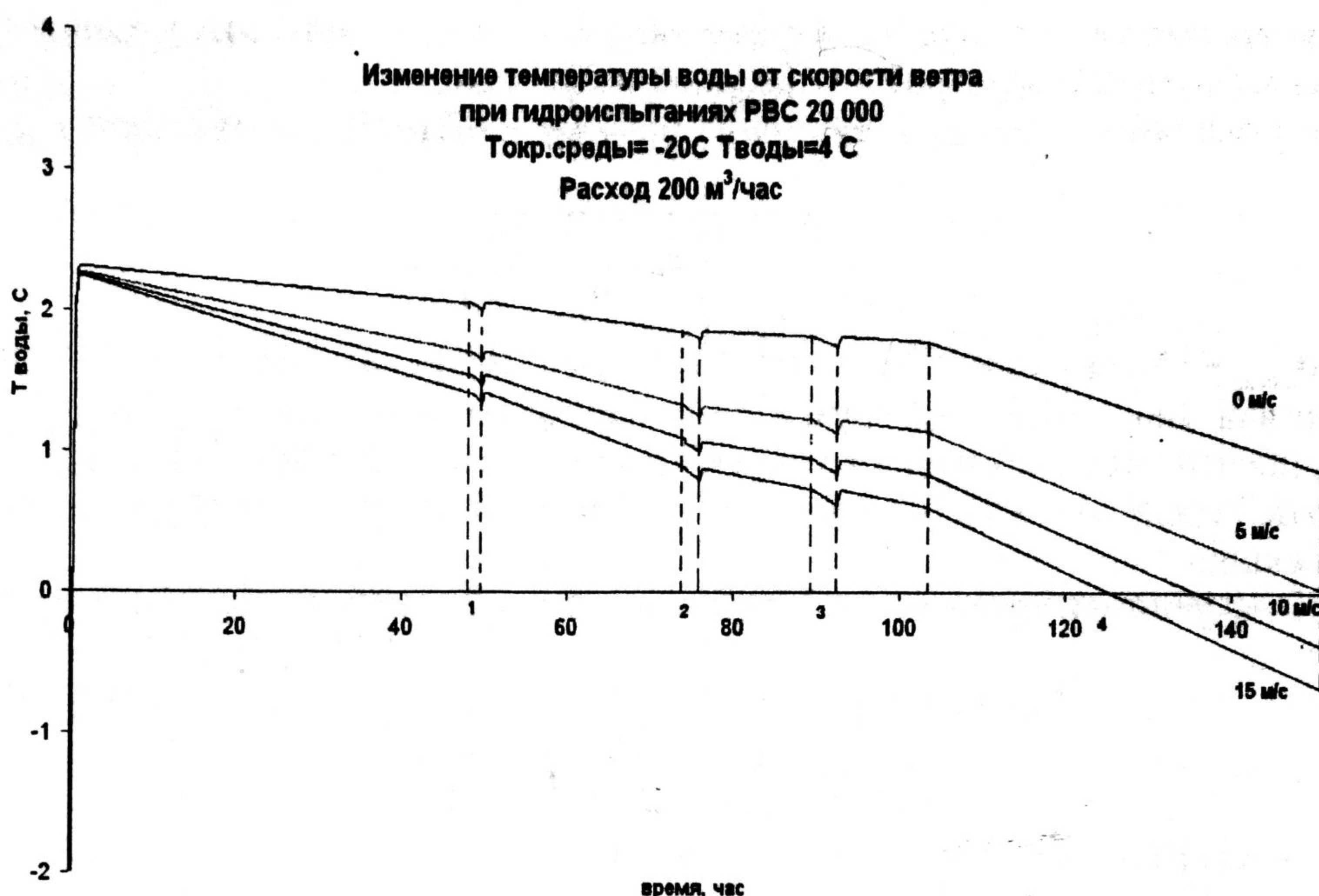


Рис. 3. Изменение температуры воды от скорости ветра во время выстаивания и заполнения резервуара: 1, 2, 3, 4 — периоды выстаивания воды в резервуаре

На основании уравнений (4), (6), (8) для различных условий заполнения и охлаждения резервуара построены графики (рис. 4, 5), позволяющие определить температуру теплоносителя в конце гидравлических испытаний.

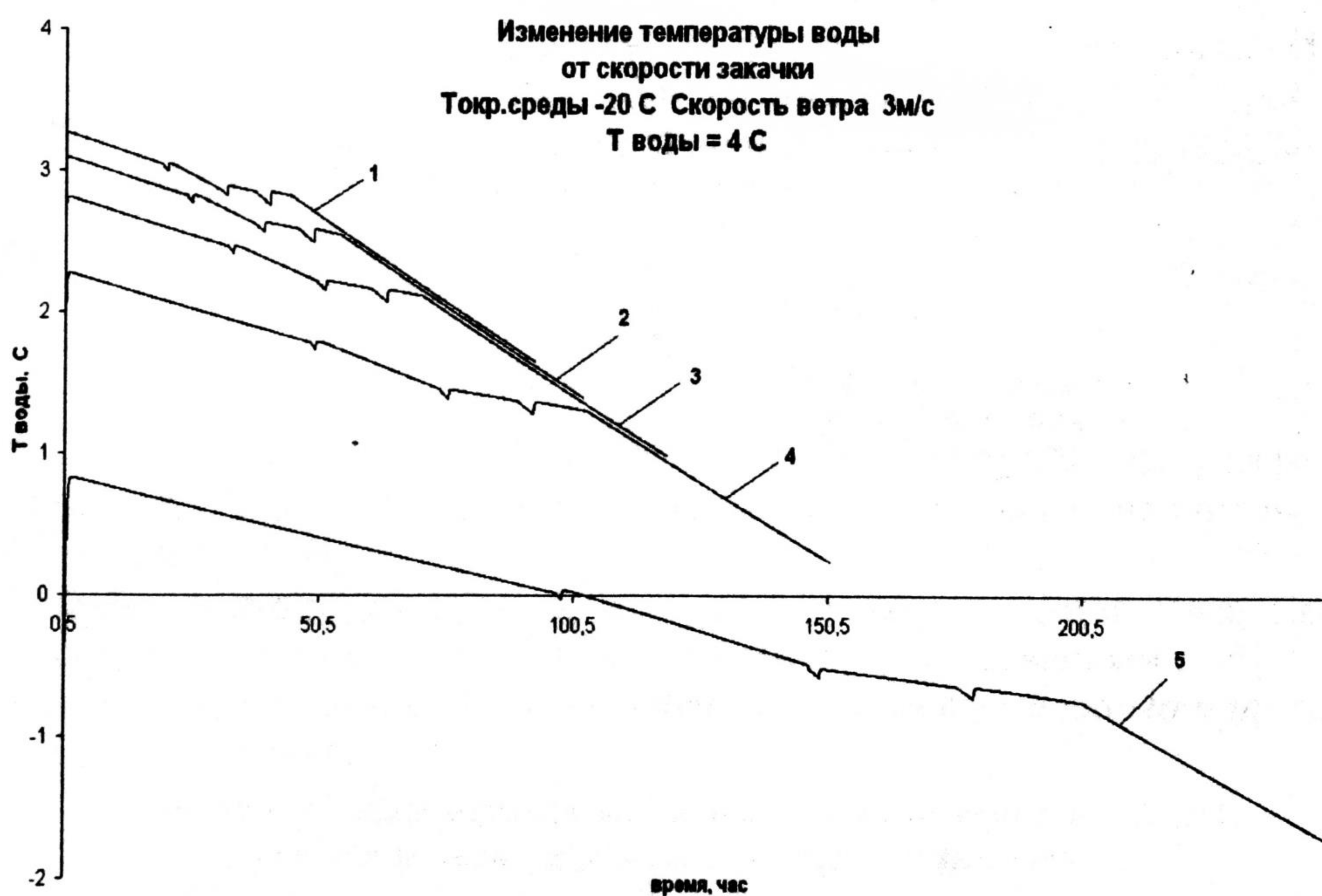


Рис. 4. Изменение температуры воды в зависимости от расхода:
1 — 500 м³/час, 2 — 400 м³/час, 3 — 300 м³/час, 4 — 200 м³/час,
5 — 100 м³/час

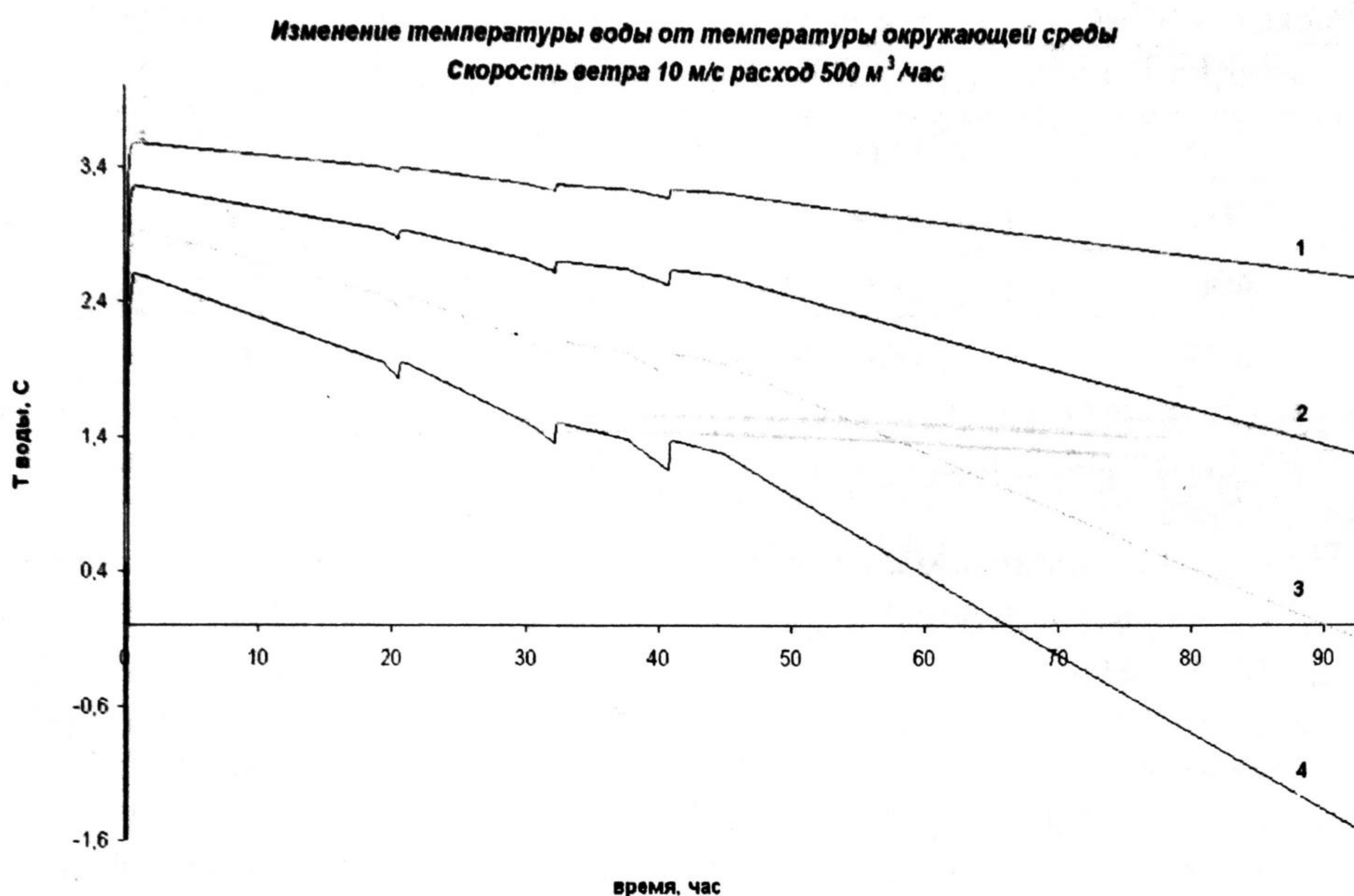


Рис. 5. Изменение температуры воды при гидравлических испытаниях в зависимости от температуры окружающей среды: 1 — -10°C ; 2 — -20°C , 3 — -30°C , 4 — -40°C

При исследовании нами была построена номограмма рекомендованных расходов для гидравлических испытаний, область под кривой характеризуется возможными условиями среды для проведения испытаний РВС-20 000.

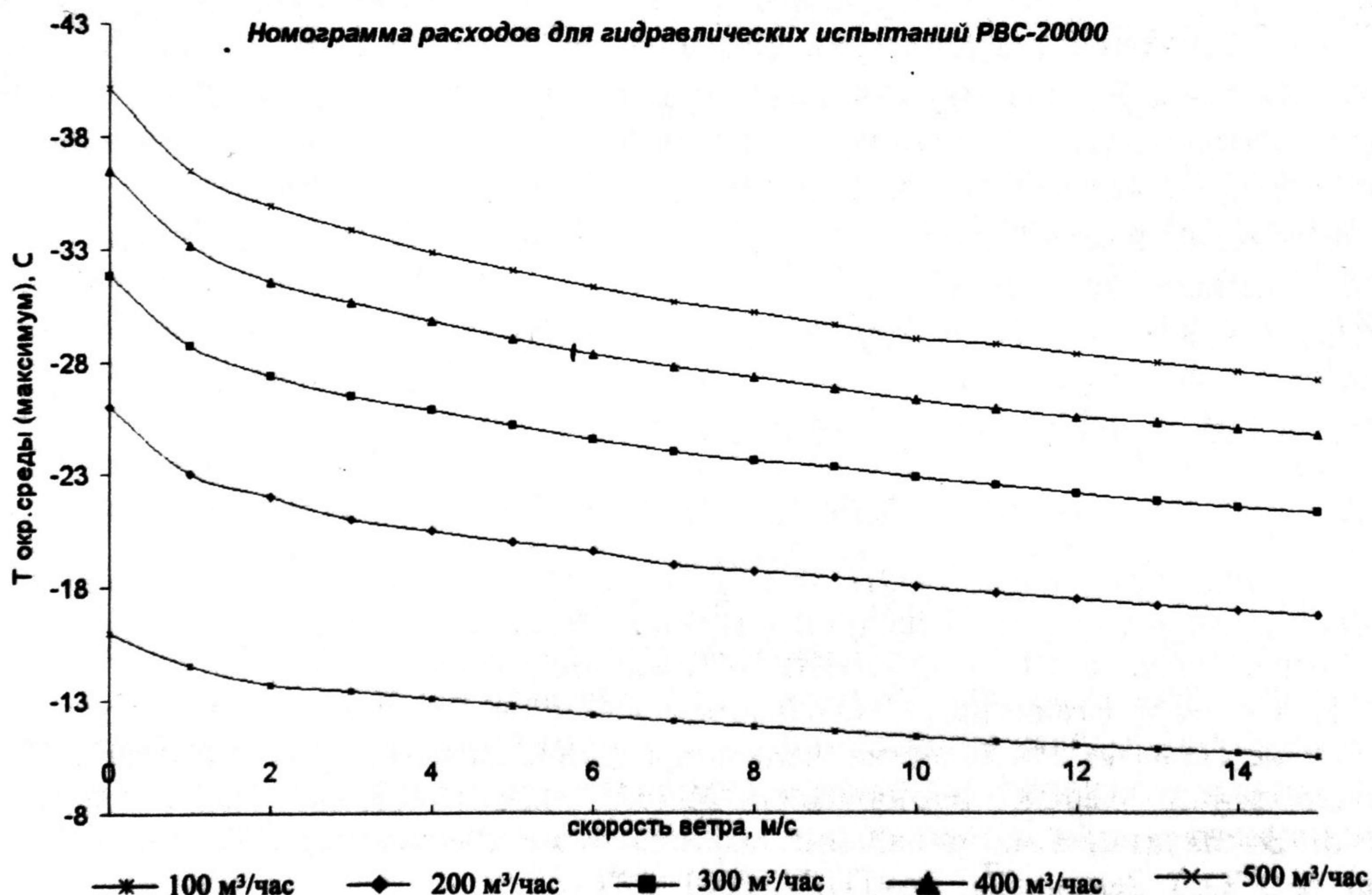


Рис. 6. Номограмма расходов при гидравлических испытаниях РВС-20000

Для построения номограмм расходов предлагаем следующие корреляционные зависимости:

Расход, м ³ /час	Зависимость температуры окр. среды от скорости ветра
100	$T = -0,0004 \cdot v^4 + 0,0142 \cdot v^3 - 0,189 \cdot v^2 + 1,2818 \cdot v - 15,823$
200	$T = -0,0009 \cdot v^4 + 0,0306 \cdot v^3 - 0,3943 \cdot v^2 + 2,485 \cdot v - 25,665$
300	$T = -0,0008 \cdot v^4 + 0,0307 \cdot v^3 - 0,4025 \cdot v^2 + 2,6545 \cdot v - 31,47$
400	$T = -0,0009 \cdot v^4 + 0,0333 \cdot v^3 - 0,4368 \cdot v^2 + 2,9354 \cdot v - 36,154$
500	$T = -0,0009 \cdot v^4 + 0,0327 \cdot v^3 - 0,4442 \cdot v^2 + 3,1069 \cdot v - 39,771$

В результате проведенных теплофизических расчетов были получены следующие выводы:

1. При неблагоприятных внешних условиях (низкая температура окружающей среды, большая скорость ветра) возможно понижение температуры воды ниже 0°C, что приведет к замерзанию воды и разрыву стенок резервуара. Поэтому расход воды 100 м³/час (время проведения гидроиспытаний равно 248,6 часов) не рекомендуется для проведения гидравлических испытаний резервуаров в зимнее время;

2. Самыми опасными периодами гидравлических испытаний резервуара в зимнее время, в связи с возможностью замерзания воды, являются: первая закачка воды в резервуар и последний этап выстаивания, длительность которого равна 48 часам;

3. Установлено, что температура воды при закачке первой порции не зависит от скорости ветра (так как происходит изменение значения температуры только в четвертом знаке после запятой), а определяется температурой днища и стенок резервуара и зависит от скорости закачки. Скорость ветра вносит сильные изменения на этапе четвертого выстаивания воды в резервуаре, так как происходит длительное взаимодействие жидкости с неблагоприятной окружающей средой;

4. При заполнении пустого резервуара первая порция теплоносителя будет быстро остывать (рис. 2), поэтому при проведении гидравлических испытаний в зимнее время первые порции воды могут замерзнуть. Быстрое остывание (замерзание) жидкости объясняется малой теплоемкостью днища и стенок резервуара ($m_0 c_0$), которые до заполнения имели температуру окружающей среды. При дальнейшем заполнении может происходить нагревание жидкости и плавление образовавшегося льда. В этом случае в уравнение (1) необходимо записать дополнительный член, который будет описывать процессы фазового перехода. Все тепло, выделившееся при плавлении льда, пойдет на изменение температуры теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт организации СТО 0030-2004 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции. М.: ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2004.
2. Стандарт организации СТО 02494680-0044-2008 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения жидких продуктов. Правила проведения испытаний на прочность, устойчивость и герметичность. М.: ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2008.
3. Эксплуатация магистральных нефтепроводов: Учебное пособие. 2-ое изд. / Под общ. ред. Ю.Д. Земенкова. ТюмГНГУ, 2001. 623 с.
4. Тугунов П.И., Новоселов В.Ф., Коршак А.А., Шаммазов А.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: учебное пособие для вузов / Под ред. А.А. Коршака, 3-е изд., испр. Уфа: ДизайнполиграфСервис, 2008. 658с.
5. Кислицын А.А. Основы теплофизики: лекции и семинары. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2002. 152 с.