

## **О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ЗАХОЛАЖИВАНИЯ КРИОГЕННЫХ КАНАЛОВ ГЕЛИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Е.В. Вайчулис*

Разработана математическая модель и методика расчета течения низкотемпературного гелия сверхкритического давления в обогреваемом канале криостатирования энергоустановки при глубоком изменении управлений и различных законах истечения на выходном концевом элементе.

Ключевые слова: канал, математическая модель, захлаживание, сверхкритический гелий, нестационарный процесс.

При проектировании сверхпроводящих циркуляционных систем криогенного обеспечения (ЦСКО), охлаждаемых гелием сверхкритического давления (СКД) обычно стремятся обеспечить необходимый расход рабочего тела в теплообменном процессе.

Как правило, при этом ограничиваются изучением только стационарных режимов работы. Возможность потери устойчивости движения потока в большинстве случаев не учитывается.

Важной особенностью термодинамических свойств гелия СКД в околокритической области является существенное уменьшение плотности при псевдокипении.

В каналах с такими потоками теплоносителей при определенных сочетаниях режимных и конструктивных параметров могут возбуждаться низкочастотные колебания, наличие которых недопустимо по соображениям теплотехнической надежности.

Пульсации температуры и давления гелия нежелательны, поскольку приводят к переходу ЦСКО в резистивное состояние с последующей аварией [1, 2].

Очевидно, что надежная эксплуатация указанных энергоустановок зависит от обеспечения устойчивого течения гелия в обогреваемых каналах. Поэтому при разработке таких систем, наряду с обычными стационарными тепловыми и гидравлическими расчетами, следует проводить расчеты на устойчивость движения потока теплоносителя по нестационарной математической модели (ММ). При этом расчеты необходимо проводить как «в малом», т.е. в линейном приближении, так и «в большом», т.е. при глубоком, свыше 100 % от номинального значения возмущении внешних управлений.

Устойчивость рабочего процесса в каналах криогенных энергоустановок не является единственным динамическим показателем, определяющим их работоспособность. В зависимости от условий работы практический интерес представляют такие показатели качества, как монотонность или колебательность переходного процесса, время его затухания, величина перерегулирования, режимы с импульсными тепловыделениями, а также время захолаживания.

Таким образом, возникает задача прогнозирования параметров гелия в условиях глубокого внешнего возмущения и оценки устойчивости конечных режимов работы систем.

Суть проблемы состоит в том, чтобы на стадии проектирования ЦСКО исключить возможность возникновения и существования пульсационных режимов и обеспечить рациональный регламент их работы в нестационарных условиях.

Относительно низкая информативность и ограниченность линейных методов моделирования нестационарных процессов, непригодность их для описания параметров рабочего процесса при значительном возмущении внешних воздействий диктуют потребность в разработке нелинейных методов.

Для решения этих актуальных задач необходимо располагать надежными ММ процессов в каналах энергоустановок, адекватно отражающих нестационарные теплогидравлические явления, происходящие при их эксплуатации.

Широкое применение гелия СКД для криостатирования ЦСКО сверхпроводящих устройств (СПУ) обусловлено рядом преимуществ и часто оказывается предпочтительнее использования его в докритическом состоянии.

К этим преимуществам в первую очередь относятся:

1) низкие значения критической температуры ( $T_{кр} = 5,2 \text{ К}$ ), и критического давления ( $P_{кр} = 0,227 \text{ МПа}$ ) [3, 4];

2) высокая интенсивность теплообмена при турбулентном режиме течения [5];

3) отсутствие фазовых превращений, которые могут приводить к значительному температурному расслоению потока из-за перегрева паровой фазы, ухудшению условий охлаждения и росту гидравлического сопротивления.

Однако результаты экспериментов [1, 5] свидетельствуют о том, что, наряду с указанными достоинствами, гелий СКД особенно склонен к тепловым колебаниям потока.

Основой анализа процессов в сложных многоканальных ЦСКО с гелием СКД всегда служат результаты исследования отдельных каналов. Поэтому в дальнейшем рассматривается расчетная схема с одиночным обогреваемым каналом, изображенная на рис. 1. Размерность всех величин в мм – СИ.

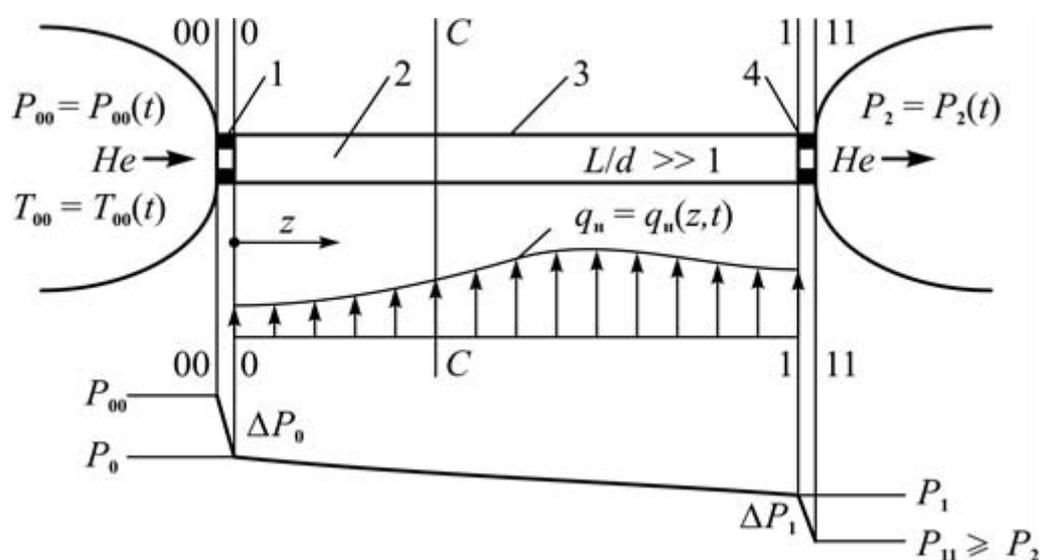


Рис. 1. Схема объекта исследования

Низкотемпературный гелий СКД поступает через входной дроссель (концевой элемент) 1 в канал 3 из напорной емкости (раздаточного коллектора) с давлением  $P_{00} = P_{00}(t)$  и температурой  $T_{00} = T_{00}(t)$ .

Плотность теплового потока  $q_n = q_n(z, t)$ , имитирующего внешнюю тепловую нагрузку, изменяется по известному закону в функции координаты  $z$  и времени  $t$ .

Из канала 3 поток гелия 2 через выходной дроссель (концевой элемент) 4 поступает в емкость (сборный коллектор) с давлением  $P_2 = P_2(t)$ .

Потери давления по длине канала в общем случае считаются соизмеримыми по значению с перепадами давления  $\Delta P_0$ ,  $\Delta P_1$  на входном 1 и выходном 4 дросселях соответственно.

На выходном дросселе 4 предполагается возможность запираания потока при достижении скорости  $u$  в сечении 11-11 местной скорости звука  $a$  ( $u_{11} = a_{11}$ ). Такой вариант краевого условия возможен в том случае, когда местная скорость звука незначительна по величине. Для низкотемпературного гелия СКД такое допущение вполне оправдано [4].

Сечение  $C-C$  определяет границу между псевдожидкостным и псевдогазовым участками (сечение с резким уменьшением плотности потока при псевдофазовом переходе, которое имеет место для теплоносителей околокритических параметров) [3, 4].

При моделировании нестационарных процессов в канале приняты следующие допущения:

1. Течение гелия СКД описывается гидравлическими дифференциальными уравнениями в частных производных сохранения массы, энергии, количества движения [2].

2. Теплоотдача и гидросопротивление канала подчиняются квазистационарными зависимостями [2, 6].

3. В каждой точке гидравлической линии поток гелия находится в состоянии локального термодинамического равновесия [2, 6].

4. Распределение температуры вдоль потока и стенок канала не зависит от диффузии тепла в осевом направлении [2, 6].

5. Гидросопротивление выходного дросселя при околосвуковых скоростях течения гелия ( $u_{11} < a_{11}$ ) и в условиях запираания потока ( $u_{11} = a_{11}$ ) определяются из соотношений, полученных для реального газа в предположении изоэнтропического расширения. При малых скоростях течения ( $u_{11} \ll a_{11}$ ) зависимость гидросопротивления от массового расхода принимается квадратичной.

6. Гидросопротивление входного дросселя подчиняется квадратичному закону, а процесс течения предполагается изоэнтальпийным.

В рамках принятых допущений задача приводится к безразмерному виду с целью сокращения числа арифметических операций при численной реализации ММ [6].

Для замыкания ММ система дифференциальных гидравлических уравнений дополняется термическим уравнением состояния:

$$\rho = \rho(P, T),$$

краевыми условиями:

$$P(0, t) = P_0(t) = P_{00} - \Delta P_0, \quad h(0, t) = h_0(t) = h_{00},$$

$$P(L, t) = P_L(t) = P_2 + \Delta P_1 \quad (\text{при } P_{11} = P_2 \text{ и } u_{11} < a_{11}),$$

или

$$u_{11} = a_{11} \quad (\text{при } P_{11} > P_2),$$

соотношениями по гидросопротивлению канала и концевых элементов, по теплоотдаче, зависимостями для термодинамических и теплофизических свойств рабочего тела.

Состояние внешней среды задается управлениями в функции времени:

$$P_{00} = P_{00}(t), T_{00} = T_{00}(t), P_2 = P_2(t), K_0 = K_0(t), K_1 = K_1(t), q_n = q_n(z, t).$$

Здесь  $h$  – удельная энтальпия гелия,  $K_0, K_1$  – коэффициенты сопротивления входного и выходного дросселей соответственно.

С математической точки зрения задача динамики течения гелия СКД в обогреваемом канале с известным набором замыкающих соотношений сведена к трем нелинейным уравнениям с нелинейными краевыми условиями и описывает эволюционный процесс движения сплошной среды в техническом объеме типа «трубопровод» (рис. 1).

Запишем систему дифференциальных уравнений в дивергентном виде относительно комплексов, зависящих от давления  $P$ , удельной энтальпии  $h$ , массового расхода  $m$ , и представим совместно с краевыми условиями в матричной форме.

Рассмотрим вариант записи краевых условий для квадратичного закона сопротивления выходного концевого элемента (рис. 1).

Дивергентная форма записи уравнений является необходимым условием обеспечения консервативности разностной схемы.

$$\begin{array}{l} \text{Система} \\ \text{уравнений} \end{array} \begin{array}{l} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} = R; \quad \begin{array}{l} \text{Граничные} \\ \text{условия} \end{array} \begin{array}{l} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \begin{array}{l} W_0 \times V_0 = H_0; \\ W_1 \times V_1 = H_1; \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Аргументы} \rightarrow \\ \rightarrow \end{array} \begin{array}{l} z \in [0, 1] \\ t \in [0, \infty) \end{array}$$

$$\Phi = \left\| \begin{array}{c} \rho \\ \rho h + m^2 / (2\rho) - P \\ m \end{array} \right\|, \quad \Psi = \left\| \begin{array}{c} m \\ mh + m^3 / (2\rho^2) \\ m^2 / \rho + P \end{array} \right\|, \quad R = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ q_w - m \cdot dH/dz \\ -\Pi_r \tau_w - \rho \cdot dH/dz \end{array} \right\|,$$

$$W_0 = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{array} \right\|, \quad V_0 = \left\| \begin{array}{ccc} P(0, t) & h(0, t) & m(0, t) \end{array} \right\|, \quad H_0 = \left\| \begin{array}{c} P_{00}(t) - K_0 m_0^2 / \rho_{00} \\ h_{00}(t) \end{array} \right\|,$$

$$W_1 = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \end{array} \right\|, \quad V_1 = \left\| \begin{array}{ccc} P(1, t) & h(1, t) & m(1, t) \end{array} \right\|, \quad H_1 = \left\| \begin{array}{c} P_2(t) + K_1 m_L^2 / \rho_1 \end{array} \right\|.$$

Наиболее естественной аппроксимацией краевой задачи является двухточечная по координате разностная схема на сетке с трехточечным шаблоном. Разностные уравнения при этом имеют более простую структуру и требуют для решения наименьшее количество арифметических операций по сравнению с другими схемами. Устойчивость решения обеспечивается применением неявной разностной схемы с аппроксимацией пространственной производной против движения потока (рис. 2).

Начальные условия задачи:

$$P(z, 0) = P^0(z), \quad T(z, 0) = T^0(z), \quad m(z, 0) = m^0(z) = \text{const},$$

удобно определять методом установления [6].

Для решения нелинейной дискретной задачи на каждом шаге по времени организуется итерационный процесс, основанный на разложении в ряд Тейлора до линейного члена в окрестности решения, полученного в предшествующей итерации.

Далее линейная разностная задача решается несколько раз методом ортогональной прогонки [6] до тех пор, пока для всех искомым функций координаты и времени: давления  $P(z,t)$ , удельной энтальпии  $h(z,t)$ , и массового расхода  $m(z,t)$  не выполнится требуемое условие точности.

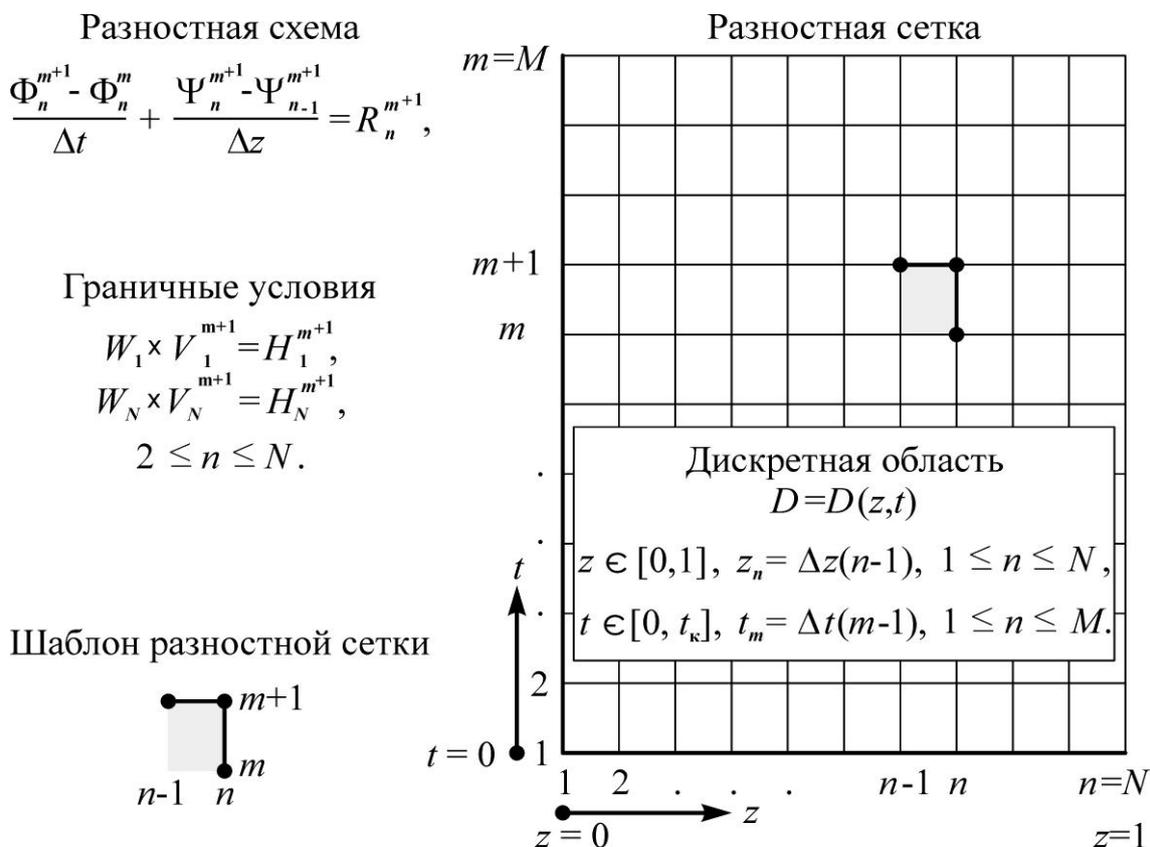


Рис. 2. Разностный аналог дифференциальной задачи

На рис. 3–6 представлены зависимости во времени соответственно температуры гелия на выходе из канала, давления гелия на входе в канал, гидросопротивлений концевых элементов, расхода гелия на входе и выходе канала с различным уровнем внешней тепловой нагрузки.

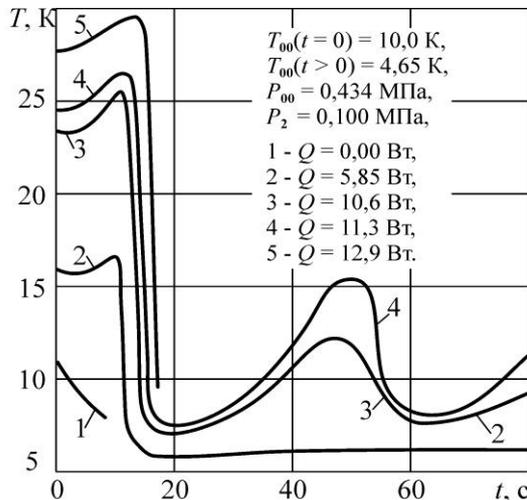


Рис. 3. Температура гелия на выходе из канала

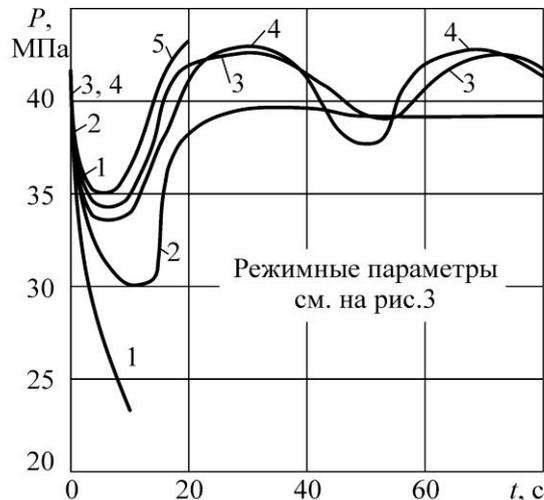
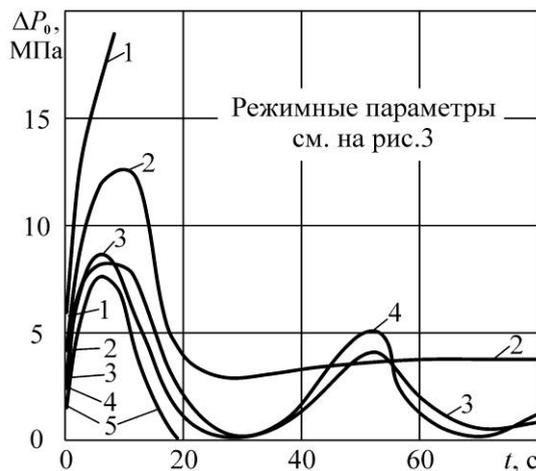
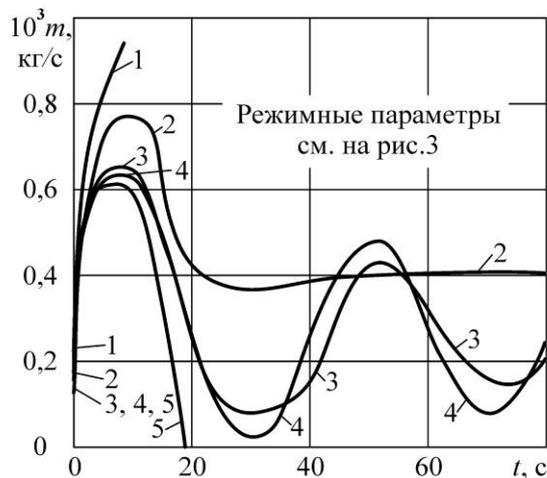


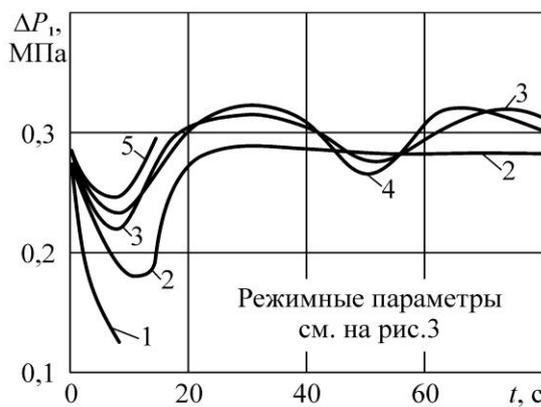
Рис. 4. Давление гелия на входе в канал



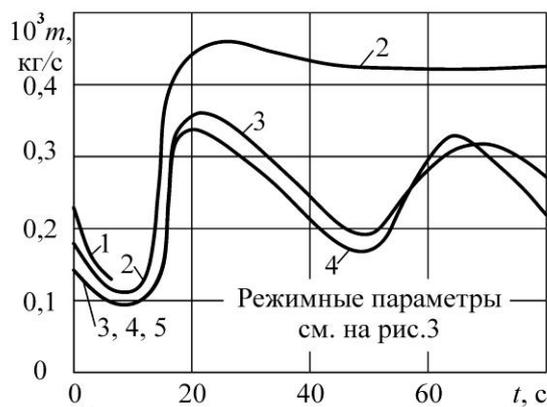
а - гидросопротивление входного дросселя



а - расход гелия на входе в канал



б - гидросопротивление выходного дросселя



б - расход гелия на выходе из канала

Рис. 5. Гидросопротивления концевых элементов на входе и выходе канала

Рис. 6. Массовый расход гелия на входе и выходе канала

Ступенчатое уменьшение температуры от 10 К до 4,65 К «отрабатывалось» в момент времени  $t = 0$  с. До возмущения температуры все стационарные параметры системы соответствовали начальным условиям краевой задачи.

В зависимости от величины внешней нагрузки картина возбуждения колебаний существенно меняется.

При отсутствии нагрузки (кривая 1) первоначальное снижение давления может быть настолько сильным, что гелий становится докритическим.

При увеличении тепловой нагрузки и уменьшении расхода в период повышения давления в канале из-за псевдовскипания наблюдается опрокидывание потока (кривая 5).

При умеренных тепловых нагрузках (кривые 2, 3, 4) возмущенная система стремится к новому стационарному режиму, соответствующему известным краевым условиям.

Результаты расчетов при численном моделировании нестационарных процессов согласуются с оценкой ТГУ конечных стационарных режимов по уравнениям первого приближения.

При низких значениях тепловой нагрузки (кривая 2) канал аperiodически выходит на новый устойчивый стационарный режим.

При повышении нагрузки наблюдается затухающий колебательный процесс, в котором время захлаживания канала может существенно превосходить наименьшее значение.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к автоколебаниям или к неустойчивости, вплоть до опрокидывания потока.

При захлаживании канала от более высоких температур, когда поток гелия плохо сжимаем и теплоемкость материала стенки соизмерима с теплоемкостью гелия, по данным расчетов происходит опрокидывание потока.

Таким образом, для обеспечения экономичной, рациональной работы криогенных систем необходимо организовать ступенчатый режим их захлаживания с постепенным снижением температуры канала до требуемого значения.

#### Библиографический список

1. Дейни, Д. Экспериментальное исследование термоиндуцированных колебаний в потоке гелия при сверхкритическом давлении / Д. Дейни, П. Ладтке, М. Джоунс // Теплопередача. – 1979. – № 1. – С. 7–15.
2. Лабунцов, Д.А. Устойчивость течения гелия сверхкритического давления при неравномерном распределении тепловой нагрузки по длине канала / Д.А. Лабунцов, П.А. Мирзоян // Теплоэнергетика. – 1986. – № 4. – С. 53–56.

3. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др.; под общ. ред. М.П. Малкова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

4. Термодинамические свойства гелия / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 319 с.

5. Богачев, В.А. Экспериментальное исследование термоиндуцированных колебаний и теплообмена при подъемном течении гелия сверхкритического давления в вертикальной трубе / В.А. Богачев, В.М. Ерошенко, Е.В. Кузнецов // Инж.-физ. ж. – 1986. – Т. 51. – № 5. – С. 719–722.

6. Горбачев, С.П. Численное моделирование динамических процессов в каналах энергетических установок с однофазным теплоносителем / С.П. Горбачев, Е.В. Вайчулис, А.В. Вайчулис, М.Н. Бочаров; Челябинский гос. техн. ун-т. – Челябинск, 1991. – 55 с. – Деп. в ВИНТИ 14.03.91 №1121 – В 91.