

УДК 621.575

Принципы трансформации теплоты в низкопотенциальной энергетике

Канд. техн. наук А. А. ДЗИНО¹, канд. техн. наук О. С. МАЛИНИНА²

¹dzinoaa@mail.ru, ²holmash_malinina@mail.ru

Университет ИТМО

Трансформация теплоты с одного температурного уровня на другой может осуществляться: с целью выработки холода; с целью понижения температуры высокопотенциального источника на более низкий температурный уровень для конкретной технологии, например, для системы отопления и горячего водоснабжения; с целью повышения температуры низкопотенциального источника на более высокий температурный уровень. В работе выполнено исследование влияния степени внутренней регенерации теплоты на энергетическую эффективность циклов абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора, абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины и абсорбционного бромистолитиевого повышающего термотрансформатора в зависимости от температуры греющего источника.

Ключевые слова: трансформация теплоты, система циклов, холодильная машина, термотрансформаторы, коэффициенты энергетической эффективности циклов, температура греющего источника.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 27.06.2018, принята к печати 15.01.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-29-33

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования:

Дзино А. А., Малинина О. С. Принципы трансформации теплоты в низкопотенциальной энергетике // Вестник Международной академии холода. 2019. № 1. С. 29–33.

Heat transfer in low-grade energetics

Ph. D. A. A. DZINO¹, Ph. D. O. S. MALININA²

¹dzinoaa@mail.ru, ²holmash_malinina@mail.ru

ITMO University

Heat transfer from one temperature level to some another can be carried out to produce cooling effect; to decrease the temperature of high-grade heat source for a specific purpose, for example, in the systems of heating and hot water supply, to increase the temperature of low-grade source. The article deals with the influence of internal heat regenerating rate on the energy efficiency of the cycles in absorption lithium bromide step-down thermal transformer, absorption lithium bromide refrigerating unit, and absorption lithium bromide step-up thermal transformer depending on the temperature of heat source.

Keywords: heat transfer, cycle system, refrigerating unit, thermal transformer, coefficients of cycle energy efficiency, the temperature of heat source.

Article info:

Received 27/06/2018, accepted 15/01/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-29-33

Article in Russian

For citation:

Dzino A. A., Malinina O. S. Heat transfer in low-grade energetics. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 1. p. 29–33.

Введение

Под термином «трансформация теплоты» понимается процесс снижения и/или повышения температуры исходной теплоты в комплексах, состоящих из тепловых машин, работающих в режиме прямого и обратного термодинамических циклов. Различают три системы трансформации теплоты: холодильная машина, понижающий и повышающий термотрансформатор [1]. Энергетическая эффективность систем на предварительном этапе исследования рассматривается с помощью циклов Карно, со-

стоящих из двух изоэнтроп и двух изотерм. Графическое изображение таких циклов представлено на рис. 1 [2].

Система I осуществляет отвод теплоты от источника $T_{\text{ннт}}$ (получение холода) с помощью обратного (холодильного) цикла. Отвод теплоты от холодильного цикла осуществляется на изотерме $T_{0,c}$. Работа холодильного цикла воспроизводится (компенсируется) с помощью прямого цикла (цикла теплового двигателя) в том же количестве. Прямой цикл осуществляется между изотермами T_b и $T_{0,c}$. Рассмотренный комплекс состоит из ком-

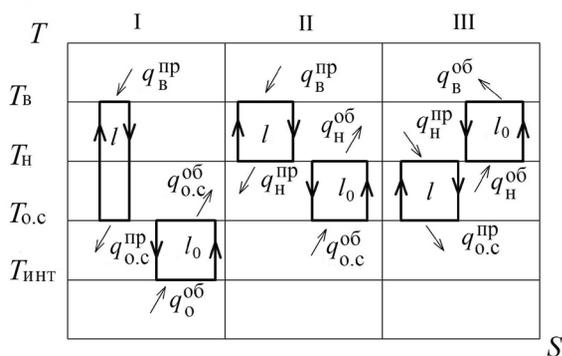


Рис. 1. Системы холодильной машины I, понижающего II и повышающего III термотрансформаторов. Температуры источников: $T_{инт}$ — низкотемпературной теплоты (холода), $T_{о.с}$ — окружающей среды, $T_н$ — бросовой или низкопотенциальной нагреваемой среды, $T_в$ — высокопотенциальной подводимой или отводимой теплоты

Fig. 1. Refrigerating unit I, step-down thermal transformer II and step-up thermal transformer III. Source temperatures: $T_{инт}$ — low temperature (cold), $T_{о.с}$ — external temperature $T_н$ — dump or low-grade heated medium, $T_в$ — high-grade heat input or output

прессорной холодильной машины (КХМ) и теплового двигателя, работающего в режиме конденсационной электростанции (КЭС). Энергетическая эффективность системы I оценивается тепловым коэффициентом ζ . Альтернативой являются теплоиспользующие холодильные машины (ТХМ), в которых для привода применяется высокотемпературная теплота.

Система II предназначена для трансформации высокопотенциальной теплоты с температурного уровня $T_в$ на более низкий температурный уровень $T_н$, например, для организации отопления и горячего водоснабжения. В комплекс входит компрессорный тепловой насос (КТН), работающий в интервале температур T_0 и $T_н$. Работа для КТН используется из теплового двигателя, работающего в режиме теплоэлектростанции (ТЭС). Энергетическая эффективность системы II, оценивается коэффициентом трансформации понижающего термотрансформатора λ . Данная система может служить аналогом абсорбционного понижающего термотрансформатора (АПНТ).



Рис. 2. Конфигурация характеристик теоретических циклов абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин

Fig. 2. Characteristics of ideal cycles for absorption lithium bromide refrigerating units

Система III предназначена для трансформации низкопотенциальной (бросовой) теплоты с изотермы $T_н$ на более высокую изотерму $T_в$. В этот комплекс входят компрессорный тепловой насос КТН, работающий в диапазоне температур $T_н$ и $T_{о.с}$. Тепловой двигатель в этом комплексе работает в режиме КЭС. Энергетическая эффективность системы III оценивается коэффициентом повышающего термотрансформатора α . Аналогом системы III может быть абсорбционный повышающий термотрансформатор (АПВТ).

В работе [3] проведено исследование влияния температуры греющего источника на выбор цикла абсорбционной холодильной машины, работающей на примере использования водного раствора соли бромной кислоты ($LiBr + H_2O$). Обобщенная характеристика зависимости теплового коэффициента от температуры греющего источника для абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) при постоянных температурах охлаждаемого и охлаждающего источников теплоты может служить иллюстрацией для построения характеристик абсорбционных холодильных машин, работающих на других альтернативных растворах (рис. 2).

Конфигурация характеристик разделена на три группы циклов в зависимости от степени внутренней регенерации теплоты. Во всех группах циклы могут осуществляться как с совмещенным, так и с раздельным тепло-массопереносом [4, 5]. Эталонном для всех циклов является образцовый цикл, предложенный Б. М. Блиером [6].

Определяющим элементом для циклов группы I будет являться наличие одного генератора и одного абсорбера. Такие машины называются одноступенчатыми.

При недостаточном значении температуры греющего источника формируется группа II, в которую входят циклы с дополнительным абсорбером. Такая машина классифицируется как двухступенчатая. Аналогом для циклов группы II является каскад, состоящий из повышающего термотрансформатора и одноступенчатой холодильной машины ПВТ — ХМ.

К группе III относятся циклы с высокой температурой греющего источника, в которых с целью повышения внутренней регенерации теплоты в схему вводят дополнительные генераторы при одном абсорбере. Такие машины называются машинами с двух- или трехступенчатой генерацией раствора.

Минимальное значение температуры греющей среды $T_h^{min I}$, при которой можно осуществить построение цикла, определяется по образцовому циклу с зоной дегазации, стремящейся к нулю. Для группы II (группы многоступенчатых машин) по образцовым циклам комплекса ПВТ — ХМ определены температура $T_h^{min II}$ и для группы III (группы машин с многоступенчатой генерацией раствора) по образцовым циклам комплекса ПНТ — ХМ определена температура $T_h^{min III}$. На рис. 2 в координатах T_h — ζ показаны области существования групп циклов на примере абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин. Области применения машин ограничены изотермами T_h^{min} и кривой зависимости $\zeta = \zeta(T_h)$. Правая граница области применения конкретно не определена, так как максимально возможная температура греющего источника как для теоретического, так и для действительного цикла, будет определяться из условия

кристаллизации крепкого раствора на холодном конце теплообменника или термической стабильности самого раствора.

При существующем многообразии термодинамических циклов и схем теплоиспользующих холодильных машин можно выделить три группы: группа I одноступенчатых машин, группа II многоступенчатых машин и группа III машин с многоступенчатой генерацией пара.

Методы исследования

В данной работе выполнено исследование влияния степени внутренней регенерации теплоты на энергетическую эффективность циклов абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора (АБПНТ), абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) холодильной машины и абсорбционного бромистолитиевого повышающего термотрансформатора (АБПВТ) в зависимости от температуры греющего источника.

Результаты расчета циклов абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора приведены в работе [7]. Характер кривых зависимости энергетической эффективности циклов абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины от степени внутренней регенерации теплоты аналогичен графическим зависимостям исследования АБПНТ. Следовательно, необходимо провести анализ влияния степени внутренней регенерации теплоты на энергетическую эффективность циклов абсорбционного бромистолитиевого повышающего термотрансформатора в зависимости от температуры греющего источника.

Схема АБПВТ с совмещенными процессами тепло-массопереноса представлена на рис. 3.

В испарителе I происходит подвод бросовой теплоты с температурой t_{s1} в количестве q_0 к рабочему телу. Испарившийся пар в испарителе направляется на абсорбцию в абсорбер II. Этот пар поглощается крепким раствором бромистого лития. Крепкий раствор образуется в генераторе III и направляется насосом VI через реге-

неративный теплообменник V в абсорбер. Реакция абсорбции экзотермическая, т. е. протекает с выделением теплоты. Эта теплота q_a отводится из абсорбера с помощью нагретой воды температурой t_{wh2} . При абсорбции раствор бромистого лития становится слабым по концентрации. Концентрация раствора восстанавливается в генераторе за счет бросовой теплоты q_h с температурой t_{h1} . Выпарившийся пар из генератора направляется в конденсатор. В конденсаторе происходит процесс конденсации. Теплота конденсации q_k направляется в окружающую среду с температурой t_{w2} . Образовавшийся конденсат насосом VII направляется в испаритель.

Расчеты выполнялись по известным методикам, опубликованным в работах [8, 9].

Зона дегазации

$$\Delta\xi = \xi_r - \xi_a, \%$$

где ξ_r, ξ_a — действительные концентрации крепкого и слабого растворов соответственно.

Кратность циркуляции раствора

$$a = \frac{\xi_r}{\Delta\xi}$$

Удельная тепловая нагрузка генератора

$$q_h = i_{3'} + (a - 1) \cdot i_4 - a \cdot i_7, \text{ кДж/кг.}$$

Удельная тепловая нагрузка абсорбера

$$q_a = i_{1'} + (a - 1) \cdot i_8 - a \cdot i_2, \text{ кДж/кг.}$$

Удельная тепловая нагрузка испарителя

$$q_0 = i_{1'} - i_3, \text{ кДж/кг}$$

Удельная тепловая нагрузка

$$q_k = i_{3'} - i_3, \text{ кДж/кг.}$$

Коэффициент трансформации повышающего термотрансформатора

$$\alpha = \frac{q_a}{q_0 + q_h}$$

Степень внутренней регенерации теплоты для АБПВТ

$$\chi = \frac{t_8 - t_4}{t_2 - t_4}$$

При $\chi = 1$ получается теоретический цикл с полной рекуперацией теплоты на теплой стороне регенеративного теплообменника. При $\chi = 0$ теплообменник отсутствует. При $1 \geq \chi \geq 0$ на теплой стороне регенеративного теплообменника имеет место конечная разность температур.

Расчеты выполнялись при следующих исходных данных: для АБПВТ температура охлаждающей воды на входе в конденсатор $t_{w1} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$, температура нагретой воды на выходе из абсорбера $t_{wh2} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Степень внутренней регенерации теплоты в для всех рассматриваемых циклов составила: $\chi = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$. Необратимые потери действительного цикла АБПВТ выбраны согласно рекомендациям, представленным в литературе [8, 9].

Расчеты выполнены при помощи математической модели АБПВТ, созданной при помощи компилятора GFortran. Термодинамические свойства водяного пара, воды и водного раствора бромистого лития [10, 11] определяли по уравнениям [8].

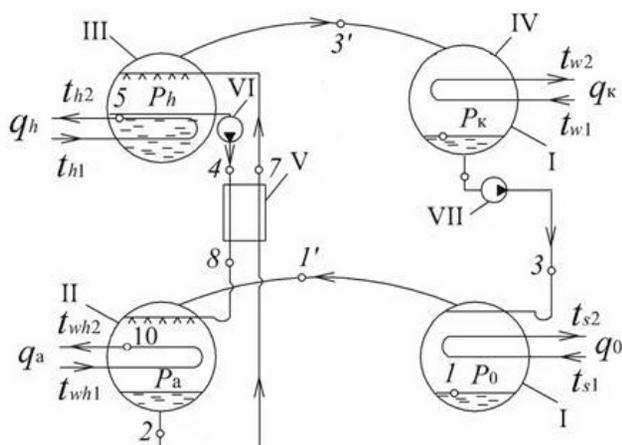


Рис. 3. Схема абсорбционного бромистолитиевого повышающего термотрансформатора I — испаритель, II — абсорбер, III — генератор, IV — конденсатор, V — растворный теплообменник, VI, VII — насосы

Fig. 3. Absorption lithium bromide step-up transformer I — evaporator, II — absorber, III — generator, IV — condenser, V — solution heat-exchanger, VI, VII — pumps

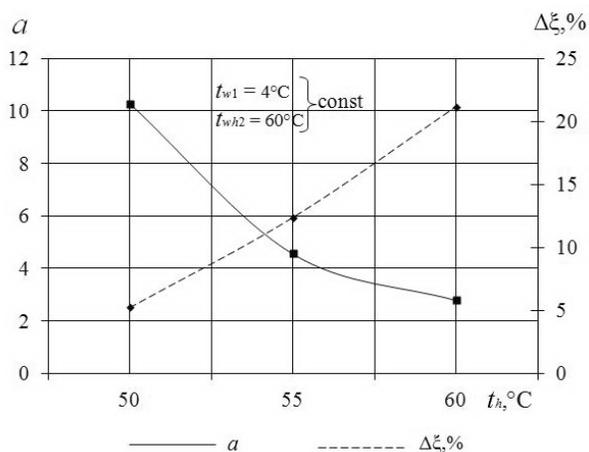


Рис. 4. Зависимость кратности циркуляции и зоны дегазации от температуры греющего источника при различной степени регенерации теплоты в цикле АБПВТ

Fig. 4. The dependence of circulation rate and degassing zone on the temperature of the heat source at different heat regeneration rates in the cycle of absorption lithium bromide step-up transformer

Минимальная температура греющего источника, при которой можно осуществлять одноступенчатый цикл с $\Delta\xi \rightarrow 0$ и $a \rightarrow \infty$, равна $t_h = 50^\circ\text{C}$. Для дальнейшего исследования были приняты следующие значения температуры греющего источника: $t_h = 50; 55; 60^\circ\text{C}$.

По полученным данным построены графики зависимости кратности циркуляции и зоны дегазации (рис. 4), коэффициента трансформации (рис. 5) от температуры греющего источника при различной степени регенерации теплоты в цикле АБПВТ.

Из графика на рис. 4 видно, что с повышением температуры греющего источника происходит увеличение зоны дегазации, которое в свою очередь приводит к снижению кратности циркуляции раствора.

Вывод

В теоретических циклах АБПВТ с полной рекуперацией теплоты на теплой стороне регенеративного теплообменника (РТО) с увеличением температуры

Литература

1. Соколов Е. Я., Бродянский В. М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981. 320 с.
2. Дзино А. А., Малинина О. С. Системы прямых и обратных термодинамических циклов для получения тепла и холода // VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г.): — СПб.: Университет ИТМО, 2015. № 1. С. 141–144.
3. Дзино А. А., Малинина О. С. Влияние температуры греющей среды на выбор цикла абсорбционной холодильной машины // VI Международная научно-техническая конференция «Казахстан-Холод 2016» (1–2 марта 2016 г.). Алматы, 2016. С. 56–58.

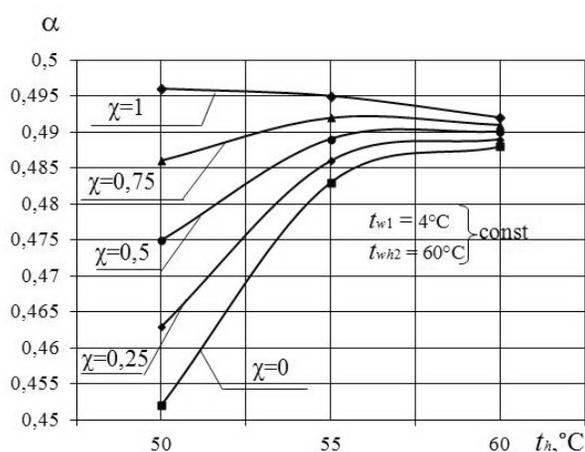


Рис. 5. Зависимость коэффициента трансформации от температуры греющего источника при различной степени регенерации теплоты в цикле АБПВТ

Fig. 5. The dependence of transformation coefficient on the temperature of the heat source at different heat regeneration rates in the cycle of absorption lithium bromide step-up transformer

греющего источника коэффициент трансформации уменьшается. В действительных циклах с конечной разницей температур между слабым и крепким растворами на теплой стороне РТО и в циклах без РТО коэффициент трансформации имеет тенденцию увеличиваться с повышением температуры греющего источника. Графики зависимости коэффициента трансформации от температуры греющего источника для действительных циклов асимптотически приближаются к графику зависимости для теоретического цикла. При достаточно больших значениях температуры греющего источника эффект повышения коэффициента трансформации прекращается.

Дальнейшие исследования будут посвящены анализу влияния параметров внешних источников теплоты на синтез систем термотрансформаторов, работающих в режимах холодильной машины, понижающего термотрансформатора, и повышающего термотрансформатора.

References

1. Sokolov E. Ya., Brodyansky V. M. Energy bases of heat transformation and cooling processes. Moscow: Energoizdat, 1981. 320 P. (in Russian)
2. Dzino A. A. Malinina O. S. Direct and reverse thermodynamic cycles for heat and cold production // VII International scientific and technical conference “low-Temperature and food technologies in the XXI century” (St. Petersburg, 17–20 November 2015). ITMO University, 2015. No. 1. P. 141–144. (in Russian)
3. Dzino A. A. Malinina O. S. The Influence of the temperature of the heating medium on the choice of the cycle of the absorption refrigerating machine. VI International scientific and technical conference “Kazakhstan-Cold 2016” (March 1–2, 2016). Almaty, 2016. P. 56–58. (in Russian)

4. А. с. 1290041 (СССР). Способ получения холода / Дзино А. А., Тимофеевский Л. С., Цимбалист А. О. — Опул. в Б. И., 1987, № 6.
5. Дзино А. А., Тимофеевский Л. С., Ковалевич Д. А. Синтез термодинамических циклов одноступенчатой абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Холодильная техника. 1992. № 6. С. 9–12.
6. Блиер Б. М., Вургафт А. В. Теоретические основы проектирования абсорбционных термотрансформаторов. М.: Пищевая промышленность, 1971. 199 с.
7. Дзино А. А., Малинина О. С. Анализ влияния температуры греющего источника на энергетическую эффективность одноступенчатого термодинамического цикла абсорбционного бромистолитиевого понижающего термотрансформатора // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 35–39.
8. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч. 1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ: Учеб. пособие / Л. С. Тимофеевский, В. И. Пекарев, Н. Н. Бухарин и др. Под ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: СПбГУНИПТ 2006. 260 с.
9. Холодильные машины: Учебник для студентов втузов специальности «Техника и физика низких температур» / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев, Л. С. Тимофеевский; Под общей ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: Политехника, 2006. 944 с.
10. Ривкин С. А., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.
11. Alefeld G. Bestimmung der termophysikalischen daten des stoffpaares wasser-lithiumbromid. Technischen Universität. München, 1991, 25 p.
4. Copyright certificate № 1290041 (USSR). A method of producing a cold / Dzino A. A., Timofeevsky L. S., and Zimbalist A. O., Publ. in B. I., 1987, No 6. (in Russian)
5. Dzino A. A., Timofeevsky L. S., Kovalevich D. A. Synthesis of thermodynamic cycles of single-stage lithium bromide absorption refrigeration machines. *Kholodil'naya Tekhnika*. 1992. No. 6. P. 9–12. (in Russian)
6. Blier B. M., Vurgaft A. V. the Theoretical basis for the design of the AB-sorption of thermotransformers. Moscow: Food industry, 1971. 199 p. (in Russian)
7. Dzino A. A., Malinina O. S. The influence of heat source temperature on the energy efficiency of absorption bromine lithium step down thermal transformer. *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda*. 2016. No 4. P. 35–39. (in Russian)
8. Thermal and structural calculations of refrigerating machines, heat pumps and thermal transformers. Part 1. Calculation of cycles, thermodynamic and thermophysical properties of working substances: Studies. guide / L. S. Timofeevsky, V. I. Pekarev, N. N. Bukharin, etc. Under the editorship of L. S. Timofeevsky. SPb. University of refrigeration and biotechnology. 2006. 260 P. (in Russian)
9. Refrigerating machines: Textbook for students of technical colleges, specialty "Technics and physics of low temperatures" / A. V. Baranenko, N. N. Bukharin, V. I. Pekarev, L. S. Timofeevsky; Under the General editorship of L. S. Timofeevsky. SPb.: Polytechnic, 2006. 944 p.
10. Rivkin S. A., Alexandrov A. A. Thermodynamic properties of water and steam. Moscow: Energy, 1980. 424 p. (in Russian)
11. Alefeld G. Bestimmung der termophysikalischen daten des stoffpaares wasser-lithiumbromid. Technischen Universität. München, 1991, 25 p.

Сведения об авторах

Дзино Анатолий Аполлонович

к. т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, dzinoaa@mail.ru

Малинина Ольга Сергеевна

к. т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, holmash_malinina@mail.ru

Information about authors

Dzino Anatoly Apollonovich

Ph. D., associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, dzinoaa@mail.ru

Malinina Olga Sergeevna

Ph. D., associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, holmash_malinina@mail.ru



The 19th China (Guangzhou) International Food Exhibition & Import Food Exhibition 2019

26-28 June 2019

China (Guangzhou) International Food Exhibition and Import Food Exhibition (IFE China) is one of the Informa trade events under Informa GE Asia's portfolio. The 19th edition will be held on 26-28 June in Guangzhou, an industrial base and import and export hub for food business. The event presents extensive opportunities to all participants to get in touch with prospective business partners in China. It is a must-attend platform for overseas food companies to enter the China market.

Contact us:

Guangzhou Informa Yi Fan Exhibitions Co., Ltd.
Address: Room 1103-1104, No.996 Xin Gang East Road, Guangzhou, 510000, China
Tel: 86-020-29191521. Fax: 86-020-29191501
E-mail: info@ifechina.com

<http://www.ifechina.com>