

La protección de las instalaciones hidráulicas contra el hielo

FOR

A. KAMINER Y J. VICHNIAK

El funcionamiento de las fábricas hidroeléctricas en las regiones frías se perturba frecuentemente en invierno por causa de las heladas. En la lucha contra estos enemigos se emplean medios de los más diferentes, inspirados, en la mayoría de los casos, por las distintas concepciones de la formación de los hielos. El autor se propone en este artículo estudiar sucesivamente los inconvenientes de las heladas para las instalaciones hidráulicas, las distintas teorías emitidas hasta el presente respecto a su formación, empezando por las más antiguas, siguiendo sucesivamente hasta las más modernas y, en fin, las medidas de protección contra las heladas, actualmente empleadas, tanto preventivas como defensivas.

Los nuevos progresos de la ciencia y el cada vez más extenso empleo de la electricidad en los más distintos dominios, comunican a la industria un desarrollo siempre más rápido, cuyos límites es difícil poder calcular.

Desgraciadamente, no es este el caso de los combustibles que forman la condición indispensable, no solamente del desarrollo, sino del mismo funcionamiento de las manufacturas y fábricas de todas clases. «Sin leña no hay fuego», este proverbio aunque un poco antiguo (porque la ciencia no ha hallado después muchas otras maneras de hacer fuego), puede ser, sin embargo, aplicado a la industria. «Sin fuerza motriz no hay industria», «Sin combustible no hay fuerza motriz». Por lo menos, así era la opinión general hasta hace algunas decenas de años todavía, pero en la época de invenciones que atravesamos, ¿qué hay de asombroso en que se haya hallado, entre otras cosas, el medio de producir la fuerza motriz sin recurrir a ningún combustible? El hombre que procura utilizar en su provecho todas las fuerzas de la Naturaleza, ha conseguido producir la fuerza motriz con ayuda de la energía desarrollada por los saltos de agua.

Ahora bien, si este nuevo aprovechamiento de la fuerza hidráulica autoriza a la industria a mirar sin terror la desaparición de los bosques, el enrarecimiento siempre creciente de la hulla y aun el agotamiento frecuente de sus yacimientos, no está todavía, desgraciadamente, lo suficientemente extendida ni perfeccionada para permitir ya, desde luego, la amplia sustitución de esta energía a los combustibles empleados hasta el día, porque la utilización de la fuerza hidráulica tiene todavía un hueso que roer con el régimen jurídico de las aguas, siempre hostil a la amplia explotación industrial de aquélla, y debe igualmente vencer numerosas dificultades técnicas, que actualmente entorpecen su desarrollo.

Ahora bien, entre estas últimas se halla una particularísima a las regiones septentrionales y que todavía no ha podido ser vencida, a pesar de los combates enérgicos que se le han librado durante algunos inviernos. Nos queremos referir a los inconvenientes presentados en las instalaciones eléctricas a causa de los hielos.

Sin embargo, los intensos fríos de este invierno también han hecho sufrir igualmente a fábricas situadas más al Sur y que ordinariamente no sufrían este inconveniente. El estudio de estas últimas presenta también, no solamente un interés científico, sino, además, una importancia práctica considerable.

I. Inconvenientes de las heladas en las instalaciones hidráulicas.—Como más adelante veremos, se pueden distinguir dos clases de hielos: el hielo de superficie y el hielo de fondo.

Distintos por su formación, están también dotados de distintas propiedades. Los inconvenientes que causan no son, pues, parecidos y exigen, por consiguiente, remedios distintos; así es que tendremos que considerar separadamente ambos casos.

1.º Los inconvenientes del hielo de superficie.—El hielo de superficie, aunque con muchos menos inconvenientes que el de fondo, presenta, sin embargo, peligro para las instalaciones hidráulicas. Cuando se trata de ríos pequeños y de muy poca corriente, la congelación que comienza por la superficie puede continuarse hasta el fondo, deteniendo así totalmente su curso y, por lo tanto, el funcionamiento de la fábrica.

Cuando un río ó un canal de conducción, demasiado importante para congelarse completamente, se cubre de una capa de hielo, su sección transversal se disminuye sensiblemente, mientras que los rozamientos se hacen mucho más fuertes que en un río ó un canal abierto de paredes unidas. La misma cantidad de agua exige una pendiente más considerable. El nivel puede, pues, elevarse en la parte agua arriba, y si no se ha tenido cuidado de reducir la admisión de la toma de agua, se corre el riesgo de ser sorprendido con un desbordamiento, que puede romper el dique y ocasionar una catástrofe; pero algunas veces la corriente demasiado rápida, al impedir la congelación regular, es decir, la formación de una capa sin interrupción, hace que el río quede, en algunos sitios, descubierto, y los pedazos de hielo que vienen de agua arriba atraviesan entonces estas lagunas, tropiezan con su borde inferior la capa de hielo siguiente y, deteniéndose, se acumulan poco a poco. A la larga se produce un abarrotamiento, que constituye una verdadera estacada y que, si el río no es muy ancho, puede detener completamente su curso. Esta estacada es igualmente peligrosa para las fábricas, bien se hallen agua arriba ó abajo, porque en el primer caso corren el riesgo de sufrir deterioro, causado por el remolino que se produce, y en el segundo porque su actividad se detiene por la falta de agua que la estacada no deja pasar.

El mismo fenómeno puede producirse por un fuerte viento que rompa el hielo ya formado. La corriente libre en esta forma arrastra los pedazos para formar estacadas análogas a las anteriores. Este accidente se produjo el año 1909 durante los meses de Febrero y Marzo en las cataratas del Niágara, donde el muro de hielo alcanzó la altura de 24 metros por encima del nivel normal del hielo, elevando el agua a una altura de 12 metros, en vez de 8,50 habitualmente.

Esta inundación causó grandes daños en las fábricas situadas agua arriba del muro de hielo (Ontario-Power C.º, Canadian Niagara-Power C.º, etc.), mientras que las construídas río abajo del muro de hielo (Niagara Falls Hydraulic Power and Manufacturing C.º, Niagara Falls Power, C.º, etc.), tuvieron que detener su funcionamiento por falta de agua.

El desbordamiento de los ríos en la primavera, causa frecuentemente daños más ó menos considerables en las instalaciones hidráulicas. Enormes bloques de hielo de todas dimensiones y materias extrañas que se hallan sobre la capa glacial en el momento del desbordamiento, obstruyen frecuentemente el río hasta detener la corriente y le fuerzan en esta forma a remontarse, inundando las fábricas agua arriba. Otras veces son arrastrados por la corriente, rompiendo todos los obstáculos naturales ó artificiales que hallan en su camino. Cuando el río es muy caudaloso la corriente arrastra puentes y estacadas, las instalaciones hidráulicas no pueden resistirlos y exigen frecuentemente mucho tiempo y dinero para reponerse de los daños sufridos.

2.º Inconvenientes del hielo de fondo.—Sin embargo, aparte de estos inconvenientes más ó menos frecuentes, pero siempre ocasionales, el hielo de superficie presenta menos peligros que

estos hielos flotantes llamados hielo de fondo, de los que más adelante expondremos la formación y propiedades.

Compuesto de cristales y de agujas de hielo muy finas arrastradas por el agua, este hielo se forma en aquellos ríos cuya corriente muy rápida no permite la formación de una capa glacial. Las instalaciones hidráulicas tienen, pues, que combatirlo muy frecuentemente, porque están construidas preferentemente en las corrientes de agua rápidas que raramente se cubren de una capa glacial y que, por el contrario, arrastran cantidades considerables de hielo de fondo. Ahora bien, este último, fluido y friable, se adosa á todo lo que encuentra é impide el funcionamiento de las máquinas. Cuando pasa á través de las rejas se aglomera en las turbinas y las detiene.

Cuando, por el contrario, este hielo se detiene en las rejas, se amasa en la cámara de colocación en carga, primeramente en superficie, luego en espesor y termina por formar en toda la cámara una masa flotante de dos á tres metros de espesor y más, que cada vez restringe más el acceso de agua á las rejas. Cuando estas últimas obstruyen, aun en parte, el nivel del río baja por detrás de ellas. La mezcla de agua y de hielo que se halla entre sus barrotes se hiela con el aire frío y transforma la reja en un muro impermeable. Este muro deja el depósito completamente vacío agua abajo y sostiene en agua arriba una carga de agua considerable, con gran riesgo de romper la reja.

Algunas veces sucede también, cuyo caso se observa en una central sobre el Sena, por ejemplo, que el hielo de fondo arrastrado por las aguas, y los pedazos de hielo adosados al fondo, llenan el canal hasta el punto de desbordar el agua. Los daños, aunque mucho menos graves que en el caso precedente, no son, sin embargo, despreciables.

¿Cómo puede evitarse el peligro de los hielos? Para combatir mejor á un enemigo es preciso conocerle. Igualmente para luchar eficazmente contra el peligro de los hielos, es necesario estudiar detenidamente su formación y las causas de esta última, así como los medios de impedirlo, ó á falta de ello, de destruir ó de hacer volver de las fábricas los hielos ya formados.

Estudiaremos, pues, primeramente la parte teórica del asunto, exponiendo las opiniones que se han emitido sobre él y las distintas teorías á que da lugar, proponiéndonos tratar en lo que sigue su lado práctico, es decir, la lucha contra los hielos en sus distintas fases y los distintos procedimientos empleados, de los que indicaremos la oportunidad y el éxito.

Ahora bien, mientras que la mayoría de los problemas técnicos de la industria moderna han sido objeto de numerosos estudios, casi de hecho no se pueden citar trabajos de alguna importancia referentes al asunto de los hielos en las instalaciones hidráulicas más que:

Un libro interesante y muy documentado del profesor americano H. P. Barnes, *Ice Formation* (1), que sirve de base á numerosos estudios sobre el particular. También los informes sobre los ríos de Winnipeg y de Bow, preparados para el Servicio de las fuerzas hidráulicas del Canadá, por los Sres. J. T. Johnston (2) y M. C. Hendry (3) y el informe del Sr. Ch. H. Mitchell (4) relativo á las fuerzas hidráulicas del Canadá que tratan

el problema de los hielos en capítulos especiales, inspirándose de cerca en la obra del Sr. Barnes.

En el número del *Engineering Record* del 17 de Julio de 1915, F. H. Allner publica un artículo sobre «La defensa contra los hielos en la fábrica hidráulica de Holtwood».

Entre los autores europeos que han escrito sobre este asunto podemos citar;

Lokhtine, Ingeniero ruso, que en un interesante estudio titulado *Fenómenos de la congelación de los ríos* (1) relata los resultados de los experimentos por él efectuados en las corrientes de agua de su país y expone una nueva teoría, deducida de ellos, respecto á la formación de los hielos.

El Dr. Luscher ha publicado en Suiza su tesis sobre «el hielo de fondo» (*Das Grundeis*) (2), cuya tesis comprende también una teoría que tiene muchos puntos de contacto con la de Lokhtine.

En fin, en Francia, sin contar á Arago y Gay-Lussac que se han ocupado del asunto, el comandante Hoc publicó en el *Génie Civil* del 21 y 28 de Enero de 1911, un documentado artículo relativo á «los hielos en las fábricas hidráulicas».

II. La formación de los hielos.—Al hablar de los hielos generalmente se representa uno esa capa transparente más ó menos espesa que como un blanco manto cubre las aguas de las regiones septentrionales á la llegada de los grandes fríos; pero el problema de los hielos no es tan sencillo como aparece á primera vista. Las observaciones (desgraciadamente poco numerosas) y los muy raros experimentos, han sido suficientes, sin embargo, para demostrar la presencia en las aguas invernales de dos distintas clases de hielos.

1.º *Hielo de superficie*.—El primero, conocido bajo el nombre de hielo de superficie (*sheet ice*), es precisamente esa capa glacial que cubre en invierno la mayoría de los lagos y de las corrientes de agua de los países fríos. Su formación, que tiene por causa la radiación y la conductibilidad de la superficie del agua, casi no ha provocado discusiones.

Observemos la congelación de una corriente de agua cualquiera. A medida que el invierno avanza, baja la temperatura del aire, llevando consigo el enfriamiento de la superficie del agua. Sin embargo, gracias á la presencia de corrientes en el interior del líquido, las capas frías descienden al fondo, cediendo su puesto á las capas todavía calientes que se remontan á la superficie y después de enfriarse son á su vez reemplazadas por las siguientes.

Este movimiento del agua tiene lugar hasta que toda su masa ha alcanzado una temperatura de 4 grados centígrados. Entonces el agua queda inmóvil y su superficie se enfria rápidamente hasta el punto de congelación. En este momento se ve aparecer en el agua largos y finos cristales de hielo, parecidos á agujas, que se separan de los bordes. En seguida se ramifican y se dividen, primeramente cerca de las orillas, luego hacia el centro, donde se unen finalmente, cubriendo toda la superficie del río con una red muy fina, una especie de tela de araña gigantesca. El agua aprisionada entre sus mallas se solidifica en seguida y se forma una delgada capa de hielo que reviste como un sudario transparente al río instantáneamente inmovilizado.

Ahora bien, el progreso de la congelación no se detiene con esto. La capa de hielo es todavía muy fina, muy frágil, el menor golpe de viento puede romperla; la Naturaleza, buena obrera, no puede dejar sus obras sin terminar. Bajo la capa transparente, el agua continúa helándose, formándose constantemente nuevas ca-

(1) *Ice Formation with special reference to Anchor-ice and Frazil*, by Howard Barnes. (John Wiley and Sons, éditeurs, New-York, 1906).

(2) *Winnipeg River Power and Storage Investigations*, by J. T. Johnston. Water Resources Paper, núm. 2, 1, Dominion Water Power Branch. Ottawa, Canadá, 1915.

(3) *Bow River Power and Storage Investigations*, by M. C. Hendry. Water Resources Paper, núm. 2. Water Power Branch. Ottawa, Canadá, 1914.

(4) *Annual Report 1914-15 of the Dominion Water Power Branch, Ottawa, Canadá 1916*.

(1) *Phénomènes de la congelation des rivières*, por Lokhtine. (Beranger, editor, París, 1907.)

(2) *Das Grundeis*, por el Dr. Luscher. (Emil Wirz, editor, Aarau, 1916.)

pas que aumenta el espesor de la capa de hielo por su cara inferior. La congelación continúa hasta que empieza á nevar, cuyo tapiz impide la radiación y, por consiguiente, que aumente el espesor de la capa glacial.

Esta última depende igualmente en gran parte de los vientos, que por un lado limpian la superficie del hielo y por otro la amontonan, determinando en esta forma el mayor ó menor espesor de la capa de hielo.

En Siberia, en el lago Baikal, tan grande que los campesinos le llaman piosamente el Mar-Santo y sobre el que se circula en trineos durante el invierno, se hallan frecuentemente sitios en donde la capa de hielo, barrida constantemente por los vientos, alcanza un espesor enorme, pero conservándose siempre tan transparente, que permite ver los peces aprisionados por el hielo ocupando variadas posiciones. Este espectáculo es tan impresionante, que frecuentemente hace retroceder á los caballos que se figuran hallarse al borde del agua corriente, pero á algunos kilómetros, ó aun á algunos metros más lejos, atravesando un campo de nieve, el viajero poco familiarizado con el camino siente de pronto romperse el hielo por el peso del trineo, debido á que en este sitio es muy débil la capa glacial para soportar el peso y toma un baño glacial, involuntario y frecuentemente muy peligroso, particularmente cuando la orilla está muy alejada. Estos puntos de capa débil llamados «polinia» se encuentran igualmente en los ríos siberianos.

El viento puede también retrasar la formación de la capa glacial rompiendo la delgada capa de hielo nuevamente formada. Algunas veces, empujando los pedazos los arroja á las orillas ó hacia el hielo más espeso y los amontona unos sobre otros. Entonces la congelación se hace irregularmente y la capa glacial que cubre por fin el río presenta un aspecto sucio y áspero.

Algunas veces sucede que la corriente de agua empieza á congelarse agua arriba. Los témpanos arrastrados por la corriente se arrojan entonces sobre el borde del hielo ya formado, y cuando termina la congelación, la capa glacial presenta en este punto un aspecto de burlete característico. Otras veces se hiela el río por las orillas mientras que el centro queda descubierto durante mucho más tiempo.

Las variaciones de temperatura ejercen igualmente una influencia sobre la capa glacial ya formada. El frío más intenso provoca grietas causadas por la disminución del volumen de hielo, pero el agua que salta por estas hendeduras al helarse las cierra rápidamente. La elevación de temperatura aumenta, por el contrario, el volumen del hielo que monta entonces sobre las orillas, donde frecuentemente forma grandes montones.

Una vez formado el hielo de superficie, se sostiene generalmente hasta la llegada de los calores primaverales que al fin liberan las aguas cautivas. El deshielo de los ríos puede igualmente presentar ciertas anomalías y, como ya hemos visto, causar graves perjuicios en las instalaciones hidráulicas.

2.º *Hielo de fondo.*—El hielo de superficie no se halla más que en los lagos y en los ríos de poca corriente. En los ríos de corriente rápida es muy difícil la congelación completa y quedan, como antes se ha dicho, descubiertos una parte del invierno y á veces todo.

Se hallan, sin embargo, en estas aguas masas de hielo esponjosas y porosas y embebidas de agua en tal forma, que parecen trozos de nieve á medio fundir. La parte no sumergida tiene un color blanquecino, mientras que la sumergida es transparente. Este hielo fluido en extremo, parece formar un conjunto con el agua que le rodea; se deforma y se reforma con un ruido seco muy característico en cada obstáculo que encuentra en su camino y no se parece en nada á los témpanos compactos y sólidos

que se ven deslizar en las corrientes tranquilas. Estas masas de hielo se encuentran también en los ríos de corriente desigual y presentan, por consiguiente, alternativas de capa glacial y de agua descubierta, bien sea flotando en los claros, bien pegada á la cara inferior de la capa glacial.

El agua que arrastra estos hielos tiene un aspecto turbio y amarillento. Cuando se coge en un vaso cualquiera y se la deja reposar, se aclara rápidamente, pero recubriéndose siempre de una fina capa glacial, formada por minúsculos cristales de hielo que estaban en suspensión en el agua agitada del río.

El mismo hielo, constituido por cristales y agujas muy finas, cubre las piedras y las algas que se hallan sobre el lecho de estas corrientes de agua y se deposita sobre cualquier objeto que se baje al fondo del río y se le deje durante algún tiempo. Frecuentemente suben estos hielos á la superficie, arrastrando en su movimiento ascendente los objetos que recubren y que á veces alcanzan pesos considerables.

¿Qué son, pues, estos hielos? ¿Cuál es su nombre? ¿Cómo se forman? Habiendo estado mucho tiempo sin estudiarse, no lo están todavía lo suficiente para aclarar bien su modo de formación. También constituyen el objeto de muchas teorías más ó menos antiguas y más ó menos justas que han dado igualmente origen á distintos nombres para designar esta especie de hielo.

El nombre más antiguo conocido en Francia y el más científico en lengua francesa es «el hielo de fondo», resultante de la teoría del mismo nombre, teoría muy extendida, pero que los estudios recientes han demostrado ser falsa.

Otro nombre dado á estos hielos flotantes, por los obreros de la fábrica de la Brillane (en el Durance) que tuvieron que combatirlos, es el de «sorbete». Este es el que emplearemos con preferencia en lo que sigue, porque no prejuzgando en nada el modo de formación, no lleva consigo, por consiguiente, noción alguna que pueda falsear el razonamiento.

Entre los nombres extranjeros citaremos el que se le da en Alemania, «Grundeis», que es la traducción exacta de «hielo de fondo», y el nombre «Sulz» empleado en la Suiza alemana. Lüscher, cuya teoría estudiaremos más adelante, distingue «Galer-teis» ó «hielo en helada», «blätteriges Grundeis» ó «hielo de fondo de capas delgadas» y «körniges Grundeis» ó «hielo de fondo en granos».

Igual sucede en Inglaterra donde al lado del nombre de «ground ice» ó «hielo de fondo», existe el de «ice-jam» ó «mermelada de hielo».

En América se le llama «frazil-ice» cuando flota sobre la superficie y «anchor-ice» cuando está pegado al fondo.

Por último, Lokhtine lo designa bajo el nombre de «aluvión glacial», como consecuencia de una nueva teoría que parece ser la más aproximada á la verdad. Para exponer todas estas teorías de la formación del sorbete adoptaremos el orden cronológico, presentándolas unas á continuación de otras en el orden en que han sido emitidas.

Teoría de Arago.—Arago, el gran físico francés, es el primero que ha hablado de ello en el *Anuario de la Oficina de Longitudes*. Atribuye la formación del sorbete, cuya presencia se ha comprobado en muchos ríos como el Sena, Támesis, Elba, Rin, Danubio, Vístula, Neva, Angara, etc., á tres causas:

1.ª Inversión del orden hidrostático por la corriente que produce la mezcla de agua que proviene de las capas frías de la superficie, cuya densidad es inferior al máximo, con la más caliente de las capas inferiores, hasta que la temperatura de todo el líquido desciende al punto de la congelación.

2.ª La formación de los cristales de hielo sobre las piedras y las asperezas del lecho del río cuya agua se enfría enteramente

á 0°, formación parecida á la de los cristales de sal que se depositan sobre los objetos puntiagudos ó irregulares, sumergidos en la solución salina saturada.

3.ª La existencia de menos obstáculos en la formación de los cristales en las capas tranquilas del fondo, que en las más agitadas de la superficie.

Ahora bien, la teoría de Arago presenta más bien un interés histórico; su valor actual es poco. Ya hemos visto, en efecto, que la primera condición es igualmente aplicable á la formación del hielo de superficie y no presenta, por consiguiente, nada de particular para la del sorbete; la segunda no es, de ningún modo, suficiente para explicar los depósitos, frecuentemente enormes, de cristales de hielo, siendo la cristalización espontánea mucho más lenta. En cuanto á la tercera causa, es contraria á la realidad, habiendo sido comprobada la presencia del hielo de fondo más bien en las corrientes rápidas que en las de aguas tranquilas.

Teoría de Gay-Lussac.—Gay-Lussac ha combatido la teoría de Arago, afirmando que la cristalización puede tener lugar, no en la solución saturada que presenta el agua á cero grados, sino únicamente en una solución sobresaturada, es decir, en el agua bajo cero, temperatura que el agua en el río no alcanza jamás. Oponiéndose á la teoría de Arago su propia teoría, según la cual el hielo, observado en el fondo, se forma de una cantidad de témpanos mínimos que flotaban en la superficie del agua durante la helada; y cuyo lado vuelto hacia el aire se ha enfriado por bajo de cero. Llevados en seguida por la corriente hacia el fondo, se adhieren por sus superficies más frías á los objetos que allí encuentran. A pesar de la certeza de algunas de las partes de esta teoría de Gay-Lussac, la echó por tierra Maur al demostrar que, al sumergirse los citados témpanos, toman la temperatura del agua.

No discutiremos, en modo alguno, ninguna de estas teorías, que ya pertenecen á la historia antigua, y las abandonaremos para pasar á ocuparnos de la conocida bajo el nombre de teoría del hielo de fondo, que ha sido, durante mucho tiempo, la única admitida y tiene todavía, actualmente, crédito cerca de muchos autores.

Teoría del hielo de fondo.—Esta teoría tiene por punto de partida la presencia, ya señalada, de finos cristales y agujas de hielo sobre los objetos que se hallan en el fondo del agua. Algunas veces estos cristales los decoran con arabescos, parecidos á los que el mohó dibuja en los muros de las cuevas húmedas; otras veces los revisten completamente con una capa de mayor ó menor espesor. Todos los objetos sumergidos profundamente en el agua, y elevados después de haber permanecido allí algún tiempo, salen cubiertos de cristales de hielo. Las mallas sometidas á igual experimento toman el aspecto de esos chales de felpilla que usan las personas frioleras.

En tiempo de sol el hielo sube á la superficie arrastrando los objetos que recubría. En la superficie forma una especie de ebullición que conserva los restos de su origen, como barro, granos de tierra, restos de todas clases, etc., que están incrustados en él.

La teoría del hielo de fondo pretende, pues, que estos cristales se han formado como consecuencia de la influencia sobre el agua de los objetos depositados en el fondo, cuya temperatura se hace inferior á la del medio que le rodea, depositándose entonces sobre estos objetos finos cristales que son el resultado del enfriamiento del agua.

Esta explicación, que tiene la gran ventaja de la sencillez, parece tan plausible que, como ya hemos dicho antes, ha sido admitida durante mucho tiempo casi universalmente, y aunque experimentos ulteriores hayan demostrado su falsedad, subsiste todavía en el ánimo de algunos autores. Constituye, igualmente, la base de una teoría un poco distinta, que según el lugar donde

se han encontrado los cristales de hielo, los divide en «frazil-ice» ó sorbete y «anchor-ice» ó hielo de fondo. Esta última teoría, expuesta magistralmente por el Sr. Barnes, profesor de Física en Mac-Gill University, en Montreal (Canadá), en su interesante libro relativo á la «Ice-Formation», antes citado, está admitida por la mayoría de los autores americanos que han tratado del problema de los hielos. Le dedicaremos á continuación un capítulo especial.

Teoría de los «frazil y anchor-ice» del profesor Barnes.—Como ya antes hemos dicho, el Sr. Barnes reconoce, que al lado del hielo de superficie (*sheet-ice*) respecto á cuya formación están acordados todos los autores, existen otras dos especies de hielo que denominan «frazil-ice» y «anchor-ice». Vamos á exponer su teoría, ateniéndonos todo lo posible á su libro. Durante esta exposición, y con el fin de evitar confusiones, daremos á estas dos clases de hielo sus nombres ingleses.

a) «*Frazil-ice*».—«Frazil» es un término de origen francés, derivado de la palabra «fraisil» (ceniza de carbón de piedra). Se importó del Canadá francés donde se empleaba para denominar á los finos cristales de hielo que se parecen á dicha ceniza. «Frazil-ice» se forma siempre en el agua descubierta, cuya corriente es demasiado rápida para permitir que la capa glacial que parte de las orillas pueda unirse en el centro del río. Frecuentemente se le llama «slush-ice» ó «barro glacial».

«Frazil-ice» es un hielo de formación superficial que no ha podido quedar helado en la capa glacial; la dimensión de sus cristales depende del grado de agitación del agua. Así la superficie de los ríos más tranquilos se cubre de finas placas de hielo que se llama «plate-ice» ó «hielo en placas». Por el contrario, en las corrientes ó al pie de las cascadas el agua se llena de partículas de hielo excesivamente finas en forma de aguja, que al ser transportadas por la corriente se acumulan en seguida en masas frecuentemente considerables.

El «frazil» se puede construir artificialmente agitando fuertemente agua en una atmósfera muy fría. Así, si un día frío del invierno se coloca un cubo de agua al aire libre y se le agita con fuerza, se transforma rápidamente produciéndose una especie de ebullición debido á la acumulación en el líquido de una gran cantidad de delgados cristales de hielo.

Puede igualmente procederse de un modo más perfeccionado; en un recipiente herméticamente cerrado se echa aire líquido; el que por medio de dos tubos de vidrio se hace pasar á un vaso, también de vidrio, lleno de agua y sumergido en una mezcla de agua y nieve cuya temperatura se mantiene á punto de congelación; por medio de una disposición especial se agita el agua del vaso y al entrar el aire frío se llena poco á poco de finas agujas de hielo exactamente iguales á las del «frazil».

Los termómetros sensibles á las variaciones de 0,0001 grado, permiten comprobar que la formación de estos cristales empieza cuando la temperatura del agua es de 0,01 grado, aproximadamente inferior al punto de congelación. Otros experimentos que han permitido determinar esta temperatura con más precisión, la han valorado en 0,014 grados centígrados en el momento de la formación de los primeros cristales de hielo, y en 0,006 cuando la cantidad de éstos últimos alcanza el 20 por 100.

Durante los grandes fríos y fuertes vientos, los ríos descubiertos se llenan hasta el fondo de agujas de hielo. El agua parece entonces ser de un color sombrío y contener innumerables granos de arena. El agua tomada durante los fríos, en cualquier momento, contiene cristales de hielo que pueden percibirse vertiendo un poco de líquido en un vaso transparente. Sin embargo, su cantidad está en relación con el tiempo que haga.

Son mucho más numerosos en los días sombríos y tormento-

sos cuando el viento sopla contra la corriente y el agua se agita violentamente y se enfría rápidamente. Los objetos sumergidos entonces en el agua se cubren de una capa espesa de «frazil», cuyos cristales se congelan igualmente en grandes masas que flotan sobre la superficie.

Por el contrario, un día claro y de sol, aunque muy frío, no favorece su formación, porque la absorción de los rayos solares por la superficie del río paraliza el efecto del enfriamiento producido por el aire.

El «frazil» se forma en masas en noches despejadas y de viento fuerte, sobre todo cuando la temperatura es suficientemente baja.

En efecto, este caso presenta la reunión de dos condiciones necesarias en su formación, que son: la radiación del agua y aun del lecho del río y la absorción del calor por el aire.

En suma, un cierto volumen de agua descubierta contiene mucho más hielo en forma de cristales de «frazil», que la que contendría la capa glacial que cubriera su superficie si la corriente muy rápida no lo impidiese. Esta es la razón de lo malos que son para las instalaciones hidráulicas los canales abiertos. Este inconveniente no desaparece cuando están descubiertos solamente en parte, porque el «frazil» que se forma en este recorrido es arrastrado en seguida por el agua hasta la capa glacial y debajo de ésta se amontona en cantidades frecuentemente tan considerables que llegan al fondo; se han visto amontonamientos de «frazil» que alcanzan á 25 metros. Llega frecuentemente á formar verdaderas estacadas á través del canal ó acumulaciones en ambos lados, cerca de las orillas, que retienen el curso del agua y á veces lo paralizan por completo.

A través de los montones de «frazil» se practican fácilmente sondeos; pero frecuentemente los cristales están tan sólidamente congelados unos á otros, que su masa resiste á toda clase de esfuerzos de penetración.

La distancia á que el «frazil» es trasladado por el agua resulta muy variable; depende de la rapidez de la corriente y de la sección del canal. Así en el río de San Lorenzo, en Montreal, se halla hasta Verrens «frazil» formado en las corrientes de la Lachine, es decir, á 19,5 kilómetros agua arriba y probablemente aún más lejos, porque el río está privado de hielo en 11 kilómetros encima de estas corrientes.

La aglomeración de cristales de «frazil» producidos por el enfriamiento de las capas inferiores del agua se hace por un procedimiento que el Sr. Barnes denomina «nucleación». Las agujas de hielo se congelan alrededor de algunas de sus semejantes ó bien de algunos cuerpos extraños, como granos de tierra, cantos, etc., que forman así los núcleos primarios. Las aglomeraciones se aumentan en seguida de más en más, algunas veces hasta alcanzar dimensiones considerables.

Cuando la temperatura del aire se eleva, y sobre todo cuando llueve, la del agua excede igualmente el punto de congelación. Sin embargo, se separa muy poco el tiempo que el agua contiene masas ó aun cristales de hielo.

b) *Anchor-ice*. — ¿Qué es, pues, esta segunda clase de hielo flotante? En las explicaciones precedentes dadas respecto al «frazil» lo hemos dejado completamente de lado. Veamos ahora cómo el Sr. Barnes describe y explica su formación.

El término de «anchor-ice», que parece de origen americano y que significa hielo de fondo, designa, así como los nombres de «ground-ice», «bottom-ice» y «ground-gru», los cristales de hielo pegados al lecho de los ríos que no se congelan en invierno. Sin embargo, se halla «anchor-ice» más bien en las corrientes de agua poco profundas y no muy tumultuosas, mientras que los ríos profundos y torrenciales dan lugar á la formación del

«frazil». Así casi no se encuentra «anchor» en las corrientes de agua cuya profundidad excede de 9 á 12 metros y se halla, por el contrario, abundancia de «frazil».

Sin embargo, algunos observadores han comprobado la presencia de grandes masas de «anchor» en el fondo del mar, cerca de la costa de Terranova, á una profundidad de 18 á 21 metros y en otro sitio aun á 31 metros. Se atribuye este fenómeno á la mayor transparencia del agua marina que permite la transmisión del calor de radiación de las mayores profundidades que las de donde puede elevarse á través de las ondas turbulentas de un río.

En efecto, se explica la formación del «anchor-ice» por la radiación de la tierra, que tiene lugar con un tiempo despejado y frío. El desprendimiento por el lecho del río de una cantidad más ó menos grande de calor, que se extiende en el aire, da lugar á la formación en el fondo de las corrientes de agua de depósitos de «anchor-ice», frecuentemente considerables. En efecto, ¿la formación de este último podría tener lugar fuera del caso de las corrientes rápidas muy poco profundas, si su fondo no se cubriera por el hecho de la radiación de una primera capa de hielo? El señor Barnes contesta esta pregunta con el razonamiento siguiente: El agua que corre por las piedras que tapizan el fondo de los ríos tiene siempre una temperatura muy próxima al punto de congelación. Las diferencias no exceden nunca de 0,01 grado. El lecho está débilmente recalentado por el calor que llega por conductibilidad de las profundidades de la tierra.

Es, sin embargo, difícil de comprender cómo puede formarse el hielo por el calor, directamente en el agua, cuya temperatura más baja observada ha sido de 0,006 grados, lo que parece no puede ejercer una gran influencia en el enfriamiento del lecho del río. A la inversa de un terreno descubierto, sometido á una acción directa, no puede, pues, helar á ninguna profundidad.

La radiación del calor del lecho del río se hace siempre en el aire más frío. Durante los días despejados el calor solar penetra á través del agua y compensa el enfriamiento producido por la radiación del fondo, pero en un día cubierto, brumoso ó nublado, los rayos caloríficos son rechazados por las nubes. Las noches despejadas de invierno, cuando no sopla el aire, son, particularmente, favorables á la radiación.

Se sabe, en efecto, que solamente una pequeña porción del calor solar puede atravesar el agua; las primeras capas de ésta absorben la mayor parte, y solamente dejan penetrar muy pocos rayos hasta el lecho del río.

Ahora bien, de otro modo sucede con la radiación del fondo, cuyos rayos, de gran longitud de onda, atraviesan el agua mucho más fácilmente. A primera vista parece que el lecho del río recibe más calor del sol del que gasta en radiación. Sin embargo, esta proporción aparente cambia completamente por la absorción por el agua de los rayos solares, la cual deja, sin embargo, pasar la mayor parte, si no todo, del calor de radiación, fenómeno que da lugar á la formación del «anchor-ice».

Así, los objetos que sufren alguna influencia por una de estas radiaciones, ejercen igualmente una repercusión en la formación del «anchor-ice». Esto sucede especialmente con los puentes, capa glacial, etc., que impiden que el calor terrestre pase á la atmósfera por la radiación; ejercen, por consiguiente, sobre el «anchor-ice» una acción contraria á la precedente. En efecto, no se halla nada de «anchor-ice» en el agua que está al abrigo de cualquier cosa. Igualmente se forma más rápidamente sobre las rocas sombrías que en las superficies claras, siendo la radiación de las primeras mucho más activa que la de las segundas. En fin, la formación del «anchor-ice» no tiene nunca lugar ni de día ni de noche, aun con los grandes fríos, cuando el cielo está ve-

lado, mientras que es muy rápida en las noches despejadas. Los rayos del sol funden rápidamente el hielo formado.

En resumen, parece probable que la radiación es, sobre todo, necesaria para el enfriamiento del lecho del río y para la formación de las primeras capas de hielo, cuyo desarrollo es auxiliado en seguida por el «frazil», cuyos cristales, siempre presentes en el agua, se amontonan sobre las capas de «anchor» ya formadas.

El desarrollo del «anchor-ice» presenta un bello aspecto de arborescencia. Parecido primeramente á un matorral, su masa se hace muy pronto tan espesa que cuesta mucho trabajo agujerearla. Presenta una estructura marcadamente granular. Vistas las aglomeraciones de este hielo á través de un agua clara, parecen ser algún bosque submarino, terminando sus capas superiores con largos tentáculos que flotan á merced de las olas.

En los días de sol, sobre todo después de noches frías, grandes masas de «anchor-ice» suben á la superficie de los ríos, por haberse fundido el hielo que los sujetaba al fondo á causa de grandes rayos de calor solar que atraviesan el agua. Estas masas glaciales en su movimiento ascendente, frecuentemente arrastran granos de tierra, piedras, grandes pedazos de rocas y otros objetos más ó menos pesados á los que estaban sujetos. Su fuerza es tan considerable, que arrastran todo lo que hallan en su camino. Así los barqueros tienen gran cuidado de no dejarse coger por estos hielos ascendentes, que les arrastrarían, inevitablemente, hacia las cascadas adonde descienden en seguida con la corriente.

Los habitantes del Canadá francés dan el nombre de «moutonne» á estas masas blanquecinas de «anchor» flotante, porque por su aspecto les recuerda el vellón de los carneros.

Ahora bien. ¿Cuál es la diferencia exacta entre el «frazil» y el «anchor»? En efecto, helándose el primero frecuentemente sobre un fondo de «anchor», aumenta los amontonamientos de este último sin que sea posible determinar exactamente la línea de separación, ni la procedencia exacta de tal ó cual capa dada. Por otra parte, el «anchor» que los cálidos rayos del sol hacen subir á la superficie, se confunde allí con el «frazil» flotante, tan estrechamente, que á veces es difícil y frecuentemente imposible reconocer la formación primitiva de estas masas glaciales arrastradas por las corrientes.

La distinción del «anchor» por la suciedad de sus cristales debida al barro y basura de toda clase que ha arrastrado del fondo del río, es raramente aplicable, porque el «frazil» también se congela frecuentemente alrededor de los granos de arena y otros objetos menudos, arrastrados por las aguas tumultuosas de los ríos de corrientes rápidas.

Esta dificultad de poder distinguirlos es causa de frecuentes confusiones entre ambas clases de hielos. Algunas personas llaman los dos por el mismo nombre, mientras que otros emplean los dos términos como sinónimos, designando una sola é igual especie de hielo.

También los autores de los estudios relativos á los hielos se ven obligados á basar la distinción entre el «frazil» y el «anchor-ice» sobre signos puramente exteriores. El siguiente extracto del informe de «Montreal Flood Commission» (Comisión fluvial de Montreal) es muy característico desde este punto de vista:

«Los términos «anchor-ice» y «frazil-ice» se aplican indistintamente al mismo hielo; sin embargo, el primero designa más especialmente al que se halla en el fondo de las corrientes de agua.

»Las dos especies, por lo demás, se parecen desde el punto de vista de su formación, produciéndose ambas únicamente en aguas descubiertas. No se forman en los ríos recubiertos con una capa glacial y su formación que tiene lugar en las aguas de la Lachine, agua arriba de los torrentes, al principio del invierno, se detiene tan pronto como se forma una capa de hielo.

»El «frazil-ice» se distingue del «anchor-ice» porque se forma en todas las aguas descubiertas, agua arriba y abajo de los rápidos de la Lachine, entre Prescott y el mar, cuando su superficie está suficientemente agitada, sea por la corriente sea por el viento, para impedir la formación de una capa glacial, mientras que el «anchor-ice» no aparece, á excepción de en las aguas muy poco profundas, más que cuando la temperatura ha descendido definitivamente por bajo cero grados.»

(El informe explica, por lo demás, de un modo un poco distinto del admitido por el Sr. Barnes, la formación del «anchor», que no atribuye á la radiación del lecho del río, sino más bien al enfriamiento de la tierra al contacto del agua que arrastra el «frazil»).

Se ve, pues, que el criterio de esta diferencia es, en suma, la situación de los hielos, situación esencialmente precaria y variable, dependiendo mucho más de las condiciones posteriores á su formación que de esta última, aunque los partidarios de la teoría de las tres especies de hielos se esfuerzan en basarla principalmente sobre la diferencia de formación.

Igualmente, el Sr. Barnes, autor muy competente y cuya obra es ley en la materia, después de largas explicaciones teóricas de las que antes hemos intentado dar un resumen, cuando quiere dar un medio práctico para diferenciarlos, se ve forzado á basarlo, igualmente que el informe antes citado, sobre la situación momentánea de los hielos, sin ocuparse de su formación ni de sus transformaciones ulteriores.

Dice: «Reina una gran confusión en lo que se refiere á poder diferenciar el «anchor» y el «frazil», provocada tanto por un mal uso de estos nombres, como por el hecho de que inmensas cantidades de «frazil» se fijan por la congelación sobre las capas ya formadas de «anchor-ice». En adelante designaremos con el término de «anchor-ice» todo hielo adherido al fondo, independientemente de su método de formación. En esta forma, el «frazil» se convierte en «anchor-ice» cuando se fija sobre el lecho del río, aunque se haya formado en el agua á consecuencia del enfriamiento de su superficie, producido por el viento ó por la corriente rápida y la radiación. El «anchor-ice», aunque formado *in situ* sobre el mismo lecho del río, se aumenta no solamente por la radiación, sino también por las acumulaciones de «frazil» arrastradas por la corriente que se fijan por la congelación».

Esta dificultad de diferencia práctica demuestra el carácter precario é ilusorio de la teoría americana. Esta última tiene, sin embargo, el mérito de servir de transición entre la teoría antigua de hielo de fondo, de la que conserva la explicación de la formación del «anchor-ice» y la teoría nueva emitida y sostenida con algunas variaciones por los Sres. Lüscher y Lokhtine, que preconiza por la admisión de la formación superficial del «frazil ice». Demuestra la incapacidad de la primera para explicar la formación de todos los hielos flotantes y hace desear la segunda por su confusión y la inutilidad, si no la imposibilidad, de su aplicación en muchos casos.

H.

(Continuará)

Nota sobre los transformadores de medida

FOR

J. M.

Es tan evidente el interés que existe en poseer transformadores de medida exactos, bien que se trate de transformadores de potencial como de transformadores de intensidad, que es inútil